

# Extracción de Parámetros Característicos del Estado del Mar a partir de Intensidades de Radares Fijos Ubicados en Plataformas Costeras

Por:

Iván Darío Arias Hernández  
Ingeniero Electrónico – Matemático

TESIS DE MAESTRÍA

Director de Tesis:  
Ph.D. Juan Carlos Vélez Díaz

Barranquilla, Atlántico, Colombia  
Enero 2014

# Extracción de Parámetros Característicos del Estado del Mar a partir de Intensidades de Radares Fijos Ubicados en Plataformas Costeras

Tesis presentada a la  
UNIVERSIDAD DEL NORTE en  
cumplimiento parcial de los requisitos para  
el título de Magíster en Ingeniería  
Electrónica

Por:

---

Iván Darío Arias Hernández

Director de Tesis:

---

Ph.D. Juan Carlos Vélez Díaz

Barranquilla, Atlántico, Colombia  
Enero 2014

# ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE GENERAL .....</b>	<b>3</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>5</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>6</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>9</b>
Abstract .....	9
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>10</b>
1.1. Planteamiento del problema .....	11
1.2. Antecedentes.....	13
1.3. Justificación .....	14
<b>2. OBJETIVOS, ALCANCES Y LIMITACIONES.....</b>	<b>16</b>
2.1. Objetivo General .....	16
2.2. Objetivos específicos.....	16
2.3. Alcances.....	16
2.4. Limitaciones .....	17
<b>3. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>18</b>
3.1. Sistema de radar .....	18
3.1.1. Estructura de un radar de pulso.....	19
3.1.2. Parámetros de un sistema radar.....	20
3.2. <i>Clutter</i> marino .....	22
3.2.1. Modulación del <i>clutter</i> marino.....	24

3.3.	Introducción al oleaje .....	24
3.3.1.	Análisis espectral .....	25
3.3.2.	Estado del mar y altura significativa.....	26
<b>4.</b>	<b>ESTADO DEL ARTE.....</b>	<b>28</b>
4.1.	Sensado remoto del mar a través de radares banda X .....	28
4.2.	Efectos del sombreado y otros factores electromagnéticos.....	29
<b>5.</b>	<b>Descripción Detallada de la solución implementada.....</b>	<b>31</b>
5.1.	Obtención de datos .....	31
5.2.	Algoritmos de extracción de variables utilizados .....	36
5.3.	Limitaciones de los algoritmos, efecto de sombra .....	41
5.4.	Ajustes propuestos a los algoritmos de reconstrucción.....	45
<b>6.</b>	<b>IMPLEMENTACIÓN DE ALGORITMOS .....</b>	<b>51</b>
6.1.	Ajuste de los parámetros RF del radar .....	51
6.2.	Implementación del método de inclinaciones ( <i>Tilt angle</i> ) [23] para la reconstrucción de la superficie oceánica.....	53
6.3.	Proceso de filtrado.....	56
6.4.	Algoritmo de interpolación para disminuir el efecto de sombreado ..	59
<b>7.</b>	<b>EXPERIMENTACIÓN Y VALIDACIÓN.....</b>	<b>64</b>
7.1.	Diseño de experimentos para encontrar los parámetros recomendables de funcionamiento (umbral y tamaño de venta) .....	64
7.2.	Validación estadística y espectral.....	71
<b>8.</b>	<b>CONCLUSIONES Y FUTUROS TRABAJOS.....</b>	<b>80</b>
8.1.	Conclusiones.....	80
8.2.	Futuros trabajos .....	81
<b>9.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>82</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 7.1. Promedio del error relativo porcentual.....	69
TABLA 7.2. Análisis de Varianza para Error relativo - Suma de Cuadrados Tipo III .....	71
TABLA 7.3. Pruebas de Bondad-de-Ajuste para Alturas ecosonda.....	74
TABLA 7.4. Pruebas de Bondad-de-Ajuste para Alturas reconstruidas .....	75
TABLA 7.5. Comparación de Distribuciones Alternas .....	76
TABLA 7.6. Datos Ecosonda .....	78

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 5.1.1. Esquema de adquisición y procesamiento de la imagen de <i>clutter</i> marino -----	31
Figura 5.1.2. Instalación de los dispositivos de adquisición en la azotea del Castillo de Salgar-----	32
Figura 5.1.3. Georeferenciación de los sensores; Castillo de Salgar: 11°2'8.39 N, 74°56'48.88 O; Ecosonda: 11°2'8.39 N, 74°56'48.88 O -----	33
Figura 5.1.4. Imagen de <i>clutter</i> marino, cada pixel corresponde a una región de $6m \times 6m = 36 m^2$ , la escala de grises viene dada por los valores de cuantización de la señal de radar (10bits = 1024 valores) -----	34
Figura 5.1.5. Mediciones de la ecosonda -----	35
Figura 5.2.1. Diagrama de flujo del método utilizado para la reconstrucción de la superficie [25] -----	36
Figura 5.2.2. Ajuste del promedio de un rayo mediante polinomio de tercer grado. El eje X está normalizado con respecto a la resolución espacial (6m.). El eje Y equivale a los valores de intensidad cuantizados con 10 bits por el ADC -----	38
Figura 5.2.3. Ilustración del proceso de cambio de intensidades a ángulo de inclinaciones -----	39
Figura 5.2.4. Ilustración de ángulos -----	40
Figura 5.3.1. Información de intensidades a lo largo de un rayo del radar asociadas al sombreado -----	42

Figura 5.3.2. Imagen de Intensidades umbralizadas, en blanco valores mayores a 350 y en negro los menores-----	43
Figura 5.3.3. Histograma de alturas reconstruidas sin incluir mejoras de interpolación-----	44
Figura 5.4.1. Curva promedio de intensidades para un rayo a lo largo del rango --	46
Figura 5.4.2. Imagen de radar a la que se le aplicó algoritmos de detección de dirección del oleaje.-----	48
Figura 5.4.3. Porción de imagen a procesar -----	48
Figura 5.4.4. Diagrama de flujo del algoritmo de detección de dirección de propagación del oleaje-----	49
Figura 6.1.1. Imagen de <i>clutter</i> adquirida con configuración automática de sintonización-----	51
Figura 6.1.2. Imagen de <i>clutter</i> con configuración manual de ganancia igual a 2200 -----	52
Figura 6.2.1. Región de 200 x 200 pixeles de la imagen de <i>clutter</i> -----	54
Figura 6.2.2. Superficie reconstruida para una ventana de 200 x 200 pixeles-----	54
Figura 6.2.3. Espectro de intensidades de la señal de <i>clutter</i> sin procesar -----	55
Figura 6.2.4. Espectro de los ángulos de inclinaciones -----	56
Figura 6.3.1. Respuesta espectral de filtro gaussiano para eliminar componentes de bajo número de onda que no corresponden a características del oleaje -----	57
Figura 6.3.2. Respuesta espectral filtro Gabor para dejar sólo las componentes del oleaje-----	57
Figura 6.3.3. Alturas significativas reconstruidas -----	58
Figura 6.4.1. Interpolación de las intensidades ensombrecidas-----	59

Figura 6.4.2. Interpolación de las intensidades ensombrecidas en un rango cercano	60
Figura 6.4.3. Interpolación de las intensidades ensombrecidas en un rango lejano	60
Figura 6.4.4. Ajuste de valore de alturas reconstruidas sin interpolación	62
Figura 6.4.5. Ajuste de valore de alturas reconstruidas con interpolación	63
Figura 7.1.1. Filtro Gaussiano (a) ventana de 50x50 pixeles, (b) ventana de 100x100 pixeles, (c) ventana de 200x200 pixeles	65
Figura 7.1.2. Filtro Gabor (a) ventana de 50x50 pixeles, (b) ventana de 100x100 pixeles, (c) ventana de 200x200 pixeles	65
Figura 7.1.3. Ventana de 100x100 pixeles	67
Figura 7.1.4. Ventana de 200x200 pixeles	67
Figura 7.1.5. Curva Hs para las configuraciones que mejor se ajustaron a los datos, VentNNThMM, NN: Tamaño de venta; Th: umbral ( <i>Threshold</i> ) MM: Valor del umbral	70
Figura 7.2.1. Gráfico de interacciones de los factores	72
Figura 7.2.2. Medias y dispersión del error relativo con respecto al umbral	73
Figura 7.2.3. Histograma de altura de la ecosonda	74
Figura 7.2.4. Histograma de alturas reconstruidas	75
Figura 7.2.5. Densidad espectral de potencia de la ecosonda	77
Figura 7.2.6. Densidad espectral de potencia para las alturas reconstruidas	78



# RESUMEN

Este documento presenta la extracción de variables oceanográficas a partir de intensidades de radares ubicados en plataformas costeras. Se aborda la adaptación de los algoritmos descritos en la literatura para tal fin con las limitaciones de situar el radar en la costa. En particular, se analiza el efecto del sombreado debido a un ángulo de incidencia bajo para proponer mejoras a los algoritmos reportados. Se muestran los ajustes del radar para lograr una configuración adecuada para la reconstrucción de la superficie oceánica. Se logró reducir el error de las variables reconstruidas a menos del 5% de medias *in situ* mediante las mejoras y ajustes propuestos.

## Abstract

The work presented in this document explains the determination of ocean variables via radar intensities located on on-shore platform. The reported algorithms to extract those variables have been adapted to face the consequences of locating radar on shore. Specifically, the shadow effects due to a low-grazing angle have been analyzed to enhance the reported algorithms. The configuration for a proper radar performance is presented. The improvements included and the radar adjustments managed to reduce the error in the variables extracted. The best configuration shows an average error less than 5% between measured *in situ* values and those reconstructed via radar.

# 1. INTRODUCCIÓN

La investigación presentada en este documento surge de la necesidad local de obtener información del comportamiento del mar en la región Caribe colombiana. Muchos son los fenómenos que se podrían conocer y consecuencias de éstos que se podrían mitigar, si se contara con información adecuada y oportuna del estado del mar. Entre estos fenómenos tenemos: el mar de fondo, la erosión costera, los tsunamis, las actividades ciclónicas, el calentamiento global, etc. Estos fenómenos afectan actividades económicas como el turismo, la pesca, las construcciones costeras, entre otras. Sin embargo, son pocas las fuentes de información sobre el estado del mar en la costa Caribe colombiana y en general en todo el país. Se cuenta sólo con cuatro boyas en la costa atlántica; una en Cartagena de Indias, una en Bocas de Cenizas, una en Puerto Bolívar y una en el golfo de Urabá [1]. Dichas boyas resultan insuficientes para generar pronósticos asertivos y hacerle frente a los fenómenos que afectan a las comunidades costeras.

La Universidad del Norte ha venido trabajando en el desarrollo de un sensor de oleaje que se adecúe a las necesidades locales. Específicamente, en la elaboración de un sensor remoto basado en tecnología de radar. Algunos de los avances en este esfuerzo han sido reportados en [2], incluyendo el desarrollo de la etapa de adquisición y digitalización de las señales del radar. El objetivo de esta investigación es adecuar el procesamiento de estas señales a las limitaciones de sistemas de radar ubicados en plataformas costeras para extraer parámetros que permitan caracterizar de manera adecuada el estado del mar.

## 1.1. Planteamiento del problema

El sensado del mar es normalmente hecho a través de instrumentos *in situ* como boyas que aunque muy precisas, presentan limitaciones en cuanto a su adquisición, instalación, mantenimiento y envío de la información. Por ejemplo, el precio de una boya oceanográfica oscila entre los 200 y 400 millones de pesos [3], lo cual resulta costoso para la creación de una red de monitoreo. Además, debido al alto costo de sus componentes y a que son ubicadas lejos de la costa, estos sensores son blancos de desvalijamientos por parte de personas inescrupulosas que buscan lucrarse con la venta de las partes hurtadas. En cuanto al envío de la información, ésta no es transmitida a estaciones cercanas sino satelitalmente a centrales oceanográficas. Lo anterior restringe la creación de centros de gestión local donde se tomen las medidas necesarias para contrarrestar los efectos del oleaje.

El reciente desarrollo del sensado remoto ha motivado el uso de radares de banda X como instrumentos alternativos para el sensado del mar. Son varias las ventajas que el anterior esquema posee como son la reducción de costos, la ampliación de cobertura, el manejo de los datos, entre otras. Un radar de banda X convencional tiene un precio aproximadamente diez veces menor al de una boya [4]. Además, debido al alcance del radar, éste puede ser ubicado en la costa, lo cual reduce los costos de instalación y mantenimiento. También se genera la posibilidad de ser ubicados en lugares vigilados para protegerlos de factores externos. Por otra parte, la cobertura de los sensores *in situ* es unidimensional mientras que un barrido del radar abarca una mayor área, adquiriendo información bidimensional del oleaje. Con respecto a la transmisión de datos, la comunicación con estaciones bases es más sencilla ya que al estar en tierra son más los

esquemas de comunicación que podrían implementarse. Las anteriores razones motivan el uso de radares como una alternativa económica para el sensado del mar en la región Caribe Colombiana.

Los estudios reportados sobre el sensado remoto del mar vía radar sugieren condiciones que resultaran complicadas de satisfacer. Por ejemplo, la literatura sugiere colocar a una altura de 50 m. la antena del radar [5]. Sin embargo, para un sistema de monitoreo remoto, instalar una plataforma de 50 m. de altura mar adentro resulta poco factible. Por lo cual, se plantea analizar qué tanto afectan las anteriores condiciones a los resultados obtenidos y si es posible o no implementar los métodos reportados aunque estas condiciones no se cumplan totalmente, tomando como base para el análisis del error de las variables reconstruidas con respecto a las medidas *in situ*.

Adicionalmente, si bien en la literatura son explicados los métodos de procesamiento de las intensidades de radar para la extracción de variables oceanográficas, son muchos los detalles que no son mencionados. Entre éstos tenemos la región de la imagen de *clutter* que se debe procesar, la configuración de los filtros y del radar, entre otros. Por esto, se hace necesario un proceso de investigación para encontrar los parámetros adecuados para la correcta extracción de la información.

## 1.2. Antecedentes

Estudios realizados han demostrado que los radares de banda X son capaces de adquirir componentes que permitan caracterizar el estado del mar. Sin embargo, estos radares son diseñados para detectar objetos específicos, como barcos o estructuras costeras. Por lo cual, los radares actuales vienen con sistemas de filtrado que eliminan las señales del radar provenientes del mar (*clutter* marino). Debido a esto, es necesario crear etapas de adquisición para captura del *clutter* marino. Para tal fin, algunos productos han sido desarrollados y comercializados para la adquisición y procesamiento de las señales de radar provenientes del mar. Entre éstos cabe destacar el sistema WaMos II con el cual se puede adquirir digitalizado el *clutter* de mar; sin embargo, estos sistemas son restrictivos y demasiado costosos (€ 9.000 por un mes, sólo el sistema de adquisición) [6] .

Con el objetivo de plantear soluciones a la problemática previamente planteada, desde 2010 el Grupo de investigación en Telecomunicaciones y Señales de la Universidad del Norte ha venido incursionando en el uso de sistemas de radar para la medición de parámetros del oleaje. La visión del grupo va encaminada al desarrollo y la futura fabricación de un sensor de oleaje basado en sistema de radar. Dicho sensor se plantea como una alternativa más económica y viable que los esquemas de medición actualmente implementados en las costas nacionales basados en boyas. Algunos miembros del grupo han hecho avances en esta tarea, logrando el diseño y fabricación de la etapa de transducción, digitalización y transferencia de las señales de radar [2]. El siguiente paso requiere implementar y adecuar los métodos de procesamiento ya reportados para la extracción de variables del oleaje con el fin de ajustarlos a las necesidades y limitaciones del sistema.

### **1.3. Justificación**

La literatura sobre métodos de extracción de variables oceanográficas vía radar se enfoca en la validación de dichos métodos más que en la influencia de los parámetros y forma de adquisición de los datos. Las condiciones que se mencionan se limitan a garantizar que los datos no se vean afectados por fenómenos como la no-estacionariedad del mar y el efecto de sombreado. Sin embargo, no se mencionan las consecuencias de utilizar estos métodos cuando estas condiciones se cumplen parcialmente. Tampoco se incluye información sobre los ajustes del radar tales como su configuración, alcance, sintonización, rango, etc.

La futura construcción de un sensor remoto de oleaje como alternativa de monitoreo local se ve afectada por las condiciones mencionadas para la adquisición de los datos. A pesar de que los esquemas de sensado remoto resultan más económicos que los tradicionales la instalación de una plataforma de 50 m. de altura, los hacen poco viables. Los radares en plataformas costeras podrían ubicarse en edificaciones o estructuras de alturas aproximadas de 20 m. Los datos obtenidos bajo estas condiciones se verían afectados por el sombreado. Sin embargo, las tendencias observadas en este trabajo sugieren que incluso bajo estas condiciones es posible extraer dichas variables, con bajas pérdidas de la exactitud del sistema.

Con esta investigación se busca adecuar y proponer mejoras a los métodos reportados en la literatura para la extracción de variables oceanográficas. Lo anterior, teniendo en cuenta las limitaciones de ubicar el radar en plataformas costeras. También se busca encontrar los parámetros de radiofrecuencia adecuados para la extracción de variables oceanográficas bajo estas condiciones.

**Impacto científico-tecnológico:** La investigación propuesta servirá para la adecuación de los métodos reportados para el sensado de mar remotamente. Esta adecuación abre las puertas a la implementación de muchos más métodos que los abarcados en esta investigación. De esta manera, se podría extraer un número mayor de variables a partir de las intensidades de radar. Dicho incremento ofrecería más información sobre el mar en las costas colombianas. Con lo anterior, los oceanógrafos e investigadores de estos fenómenos en el país contarían con datos adicionales de utilidad al momento de hacer predicciones e investigaciones.

**Impacto en la producción y la competitividad:** La implementación de un sensor remoto de oleaje adecuado a las necesidades locales, abre la posibilidad de crear una red de monitoreo nacional. Esta red podría generar información sobre nuestras costas y ofrecer mayor información para hacerle frente a fenómenos que afectan a actividades económicas tales como la navegación, el turismo, la pesca, la construcción, entre otras.

**Impacto en el medio ambiente y/o sociedad:** La ampliación de la información sobre el oleaje permitirá conocer de una mejor manera fenómenos como la erosión costera, actividades ciclónicas, mar fondo, etc. Esta información sería de utilidad para realizar predicciones del oleaje y atenuar sus consecuencias. Así, se podría mejorar la calidad de vida de las personas cuya cotidianidad se ve afectada por la relación con el mar, tales como pescadores, comerciantes, entre otros.

## 2. OBJETIVOS, ALCANCES Y LIMITACIONES

### 2.1. Objetivo General

Mejorar los métodos de procesamiento de *clutter* de mar analizando los parámetros radioelectrónicos de la señal recibida por el radar.

### 2.2. Objetivos específicos

- ✓ Realizar una revisión bibliográfica en búsqueda de métodos de procesamiento del *clutter* de mar para la caracterización de estado del océano.
- ✓ Mejorar los métodos propuestos analizando la interacción de los componentes electrónicos y la señal RF.
- ✓ Comparar y validar los resultados obtenidos con resultados reportados por organizaciones o medidas *in situ*.

### 2.3. Alcances

Se plantean los siguientes alcances:

- Se realizarán mejoras al procesamiento de las intensidades de radar teniendo en cuenta los parámetros radioelectrónicos del sistema.
- Se reconstruirán a partir de intensidades de radar la altura significativa del oleaje, la dirección y el periodo del campo de oleaje.
- Se compararán los resultados obtenidos con mediciones reportadas por organismos privados o estatales o mediciones propias.



## **2.4. Limitaciones**

Las siguientes son las limitaciones del proyecto:

- La recolección de datos se hará con los equipos que posee el grupo de investigación en Telecomunicaciones y Señales.
- La recolección de los datos se realizará ubicando el radar en plataformas costeras.
- El rango de la medición no superará los 2 km.
- La reconstrucción de los parámetros que caractericen el estado del mar se hará usando métodos reportados en la literatura.

## 3. MARCO TEÓRICO

### 3.1. Sistema de radar

Un radar es un sistema de detección y localización basado en la reflexión de ondas electromagnéticas. Es usado para la navegación tanto aérea como marina, la detección de vehículos y personas, el sensado remoto de variables ambientales, entre otras aplicaciones. Mediante la recepción del eco producido por una señal transmitida, el sistema de radar es capaz de identificar la presencia de un objeto así como también su distancia. Los radares son utilizados para rangos de cobertura cortos y amplios (en la terminología de radares, se usa la palabra rango para indicar distancia). Su principal ventaja es que funciona adecuadamente ante condiciones extremas del entorno; lluvia, oscuridad, niebla, etc [7].

La palabra RADAR proviene de las siglas en ingles *RAdio Detection And RAnging*. El nombre refleja la importancia de los primeros trabajos para la creación de un dispositivo que detectara la presencia de objetos y su rango. Aunque los radares actuales son capaces de extraer más información, la medida del rango es aún una de sus características más importantes [8]. A continuación se explica la forma de funcionamiento general de un sistema de radar.

Los radares poseen una etapa de transmisión y otra de recepción. Normalmente una misma antena es usada para ambas etapas. Inicialmente, el transmisor genera una señal electromagnética que se propaga por el espacio. Parte de la energía transmitida incide sobre el blanco a detectar, reflejando la energía en diferentes direcciones. La energía reflejada por el objeto es captada por la antena del radar, la cual luego es procesada por el sistema. El

rango es hallado midiendo el tiempo que tarda en ir la señal del radar al objeto y luego regresar de nuevo al radar [8].

### **3.1.1. Estructura de un radar de pulso**

Los radares de pulsos son llamados así debido a que emiten un pulso modulado de corta duración y alta potencia. Después de la transmisión, el radar cambia su configuración para recibir la señal reflejada de dicho pulso. Mediante un mecanismo de conmutación, el sistema usa la misma antena tanto para la transmisión como para la recepción. Luego de transmitir un pulso, un circulador cambia la funcionalidad de la antena a elemento receptor. La energía recibida es guiada hacia el sistema de procesamiento. Luego que la señal reflejada es recibida, se conmuta de nuevo la antena hacia el sistema de transmisión para que un nuevo pulso sea enviado. De esta manera se aprovecha la antena tanto para la transmisión de los pulsos como para la recepción de los ecos de los mismos [8].

La antena de los radares de pulso normalmente está sujeta a una base giratoria que le permite generar un barrido completo, por lo que es capaz de adquirir información de todo su alrededor. En este sentido, un barrido completo del radar puede ser visto como una imagen en coordenadas polares con una resolución  $\Delta r$  dada por la siguiente expresión [8]:

$$\Delta r = \frac{c}{2f_{ADC}} \quad (3.1)$$

Donde  $c$  denota la velocidad de la luz y  $f_{ADC}$  la frecuencia de muestreo del convertidor analógico-digital.

### 3.1.2. Parámetros de un sistema radar

**Rango:** El rango hace referencia a la distancia de un objeto y el radar. Éste es hallado mediante el tiempo  $T_R$  que tarda la onda electromagnética en viajar desde el radar al objeto. Las ondas electromagnéticas en el espacio libre viajan a la velocidad de la luz. Por lo cual, el tiempo que tarda una señal en llegar a un objeto ubicado a un rango  $R$  y luego regresar al radar es  $2R/c$ . Por lo cual, el rango o distancia del radar a un objeto vendría dado por [8]:

$$R = \frac{cT_R}{2} \quad (3.2)$$

**Rango máximo:** Una vez es transmitido un pulso por el radar, debe pasar suficiente tiempo para que regresen todas las señales de eco significativas a la antena antes de transmitir el siguiente pulso. Debido a esto, la tasa a la cual los pulsos deben ser transmitidos depende del rango hasta donde se espera aún recibir una señal detectable. Si el tiempo entre pulso  $T_p$  es muy corto, una señal de eco de un rango lejano podría llegar después de la transmisión del siguiente pulso y afectaría las señales de eco del pulso actual. Lo anterior generaría una detección errónea del rango al cual es asociado a una medida. El rango máximo se refiere a la zona de cobertura abarcada por la señal del radar en función del tiempo entre un pulso y otro. Viene dado por la siguiente expresión [8]:

$$R_{max} = \frac{cT_p}{2} = \frac{c}{2f_p} \quad (3.3)$$

Donde  $T_p$  es el periodo de repetición de los pulsos y  $f_p$  la frecuencia de repetición de los pulsos (*PRF*).

**Radar Cross Section (RCS):** El RCS ( $\sigma$ ) hace referencia a relación entre la potencia transmitida por el radar y la recibida debido al eco producido por un blanco. En general, la potencia recibida por el radar ( $P_r$ ) debido a la presencia de un objeto detectable viene dada por [8]:

$$P_r = \frac{P_t G}{4\pi R^2} \cdot \frac{\sigma}{4\pi R^2} \quad (3.4)$$

Donde  $P_t$  es la potencia transmitida durante el tiempo de pulso  $T_p$ ,  $R$  el rango o distancia del radar al blanco y  $G$  la ganancia de la antena. Luego, el RCS viene dado por [8]:

$$\sigma = 4\pi R^2 \cdot \frac{|E_r|^2}{|E_i|^2} \quad (3.5)$$

Donde  $E_r$  es la energía recibida por el radar y  $E_i$  la energía irradiada. El RCS tiene unidades de área; sin embargo, no está propiamente relacionado con el tamaño del blanco que produce una señal de eco sino con su geometría o forma [8].

**Ecuación del radar:** Existen diferentes ecuaciones que relacionan las variables del radar; potencia transmitida y recibida, ganancia de la antena, rango, geometría del blanco a detectar, etc. Aunque equivalentes, estas ecuaciones brindan información desde diferentes perspectivas. A continuación se presentan las dos formas más comunes de la ecuación del radar [9]:

$$P_r = \frac{P_t G A_e \sigma}{(4\pi)^2 R^2} \quad (3.6)$$

$$R_{max} = \left[ \frac{P_t G A_e \sigma}{(4\pi)^2 S_{min}} \right]^4 \quad (3.7)$$

Donde:  $A_e$ : Área efectiva de la antena;  $R_{max}$ : Rango máximo al cual un objeto puede ser detectado;  $S_{min}$ : Potencia mínima detectable.

La ecuación (3.6) relaciona la potencia recibida con las variables del radar, mientras que la ecuación (3.7) brinda información del rango hasta donde se podría detectar un blanco en función de la sensibilidad o potencia mínima detectable.

### **3.2. *Clutter* marino**

En la terminología de radar, la palabra *clutter* es usada para denotar señales no deseadas del entorno natural. Incluye los ecos de la tierra, el mar, clima (principalmente lluvia), aves e insectos. Puntos discretos fijos como torres de celulares, edificios, y otras estructuras similares producen niveles altos de eco no deseados que también son considerados como *clutter*. El *clutter* puede enmascarar la presencia de objetos que se deseen detectar [10].

Las señales provenientes del entorno no son siempre indeseadas. Por ejemplo, una nube puede ser confundida con un avión por un radar de tráfico aéreo; sin embargo, los sistemas de nubes serían un blanco a detectar para los radares meteorológicos. Las señales de eco producidas por la tierra pueden interferir con muchas aplicaciones de radar, pero son de interés para aplicaciones de levantamiento y realización de mapas. Las mediciones hechas por un radar y otros sensores para determinar variables ambientales de la tierra, el mar, el clima y otros fenómenos naturales son conocidas como sensado remoto [8].

Los radares náuticos son usados en la navegación para detectar barcos y otras estructuras. El *clutter* producido por la interacción de la señal RF del radar con el océano genera niveles de intensidades altos. Estos niveles pueden ser confundidos con blancos

detectables como barcos. Por lo cual, los sistemas de radares náuticos vienen con etapas de filtrado para eliminar el *clutter* marino. Sin embargo, estudios han demostrado que a partir del *clutter* marino es posible la extracción de parámetros que permitan caracterizar el estado del mar. Estos estudios serán abordados en el siguiente capítulo.

Las intensidades de radar obtenidas del mar dependen de la forma de la superficie marina así como de la dirección de propagación del oleaje. La superficie oceánica genera una señal de eco cuando las ondulaciones u olas capilares del océano son comparables con la longitud de onda de la señal RF del radar. Lo anterior es conocido como efecto de Bragg. Los radares de alta resolución como los de banda X ofrecen una longitud de onda comparable al de las olas capilares producidas por el viento. Las olas de mayor longitud, cuya amplitud determina el estado del mar, no generan una señal eco; sin embargo, son moduladas por las olas capilares que sí son percibidas por el radar, por lo cual, es posible determinar las características del mar mediante la demodulación de las intensidades producidas por las olas capilares [11], [12].

La altura de una ola y la señal de eco recibida no están directamente relacionadas. Son varios los fenómenos que afectan a la señal RF del radar antes de llegar a la antena tales como el efecto de *sombreado*, fenómenos de dispersión atmosféricos, entre otros. A un ángulo de incidencia bajo, la señal del radar no es capaz de irradiar completamente la superficie incidida. La parte frontal de una ola puede ocultar otras olas o parte de ésta que esté más atrás, por ende no se tiene información de aquellas zonas afectadas por el ensombrecimiento. A lo anterior se le conoce como *efecto de sombreado* [5].

### 3.2.1. Modulación del *clutter* marino

La señal de *clutter* está compuesta por la interacción de efectos aerodinámicos, hidrodinámicos, geométricos (inclinación de la superficie oceánica) y sombreado. De manera general la intensidad de *clutter* marino  $M$  puede ser descrita de la siguiente forma [13]:

$$M = M_{aero} + M_{tilt} + M_{hidro} + M_{sombra} \quad (3.8)$$

$M_{aero}$  corresponde a la modulación generada por la variación en la fricción inducida por el viento sobre la superficie del mar.  $M_{tilt}$  es producida por efectos geométricos de la superficie. Se presenta debido a que una mayor cantidad de potencia hacia la antena es reflejada cuando la superficie oceánica se encuentra más inclinada.  $M_{hidro}$  es ocasionada por efectos hidrodinámicos. Finalmente,  $M_{sombra}$  corresponde a la pérdida de información debido a las regiones que son ocultadas por olas más grandes. Por ende no se obtienen intensidades de estas zonas y sólo se procesa ruido.

### 3.3. Introducción al oleaje

El oleaje son ondas que se propagan por la superficie oceánica. Son producidas por la interacción entre el viento y el océano. Principalmente existen dos tipos de olas; las gravitacionales y las capilares. Las gravitacionales se caracterizan por tener longitudes de ondas y amplitudes altas. Las capilares son producto de la interacción directa del océano con el viento. Poseen longitudes de ondas pequeñas y baja densidad espectral de energía [14]. Como se ha mencionado, es a través de estas últimas que los radares son capaces de percibir el mar.



El oleaje causado por la interacción entre la superficie oceánica y el viento se conoce como mar de viento. Dependiendo de la velocidad del viento, la distancia promedio con la que éste se desplace a lo largo de la superficie (*fetch*) y su duración, se presentarán olas con mayor amplitud y energía propagándose en la misma dirección del viento. A medida que las olas se alejan de la zona de generación, éstas se mezclan de manera aditiva con las olas provenientes de diferentes direcciones formando olas de mayor energía, las cuales producen el mar de fondo también conocido como mar de leva [15].

### 3.3.1. Análisis espectral

El oleaje puede verse como una expansión de series de senos y cosenos tridimensional [16], es decir:

$$\begin{aligned} \eta(r, t) = & A_0 + \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n \cos(k_n \cdot r - \omega_n t - \phi_n) \\ & + \sum_{n=-\infty}^{\infty} B_n \cos(k_n \cdot r - \omega_n t - \Phi_n) \quad (3.9) \end{aligned}$$

Donde  $\eta$  corresponde la altura de la superficie,  $A_n$  y  $B_n$  a la amplitud de cada componente,  $k_n$  al número de onda,  $r$  al rango,  $\omega_n$  a la frecuencia angular y  $\phi_n, \Phi_n$  a los desfases. El anterior análisis es hecho para un perfil unidimensional del oleaje en función del rango y tiempo. Es posible expandir el análisis a una región bidimensional, tomando  $r$  y  $k_n$  como los vectores de posición  $(x, y)$  y número de onda  $(k_x, k_y)$  respectivamente.

Luego, el espectro del oleaje puede ser visto en tres dimensiones; número de ondas (bidimensional) y frecuencia. Estudios como los reportados en [17] demuestran una

relación entre las componentes de número de onda y las de frecuencia en el espectro. Este mapeo es conocido como relación de dispersión y viene dada por:

$$\omega = \sqrt{gk \tanh kd} + \vec{k} \cdot \vec{u} \quad (3.10)$$

Donde  $g$  corresponde a la constante de gravedad,  $d$  a la profundidad de océano,  $\vec{k}$  el vector de número de onda y  $\vec{u}$  la corriente superficial. La ecuación (3.8) relaciona las componentes angulares y de números de onda que corresponden al oleaje en el espectro tridimensional.

### 3.3.2. Estado del mar y altura significativa

El comportamiento de la superficie oceánica es considerado como un proceso estocástico normal [14]. Debido a esto, el análisis del estado del mar se hace bajo una base estadística. Uno de los principales parámetros que permite caracterizarlo es la altura significativa ( $H_s$ ); esta variable es una medida de que tan intenso es el oleaje. Se basa en la dispersión de altura del oleaje a lo largo del tiempo y puede ser hallada multiplicando por cuatro la desviación estándar de la superficie marina [14]. Es decir:

$$H_s = 4 \times (\langle \eta(t) - \bar{\eta} \rangle^2)^{1/2} \quad (3.11)$$

Donde  $\eta(t)$  es la altura de la superficie marina a través del tiempo y  $\bar{\eta}$  su promedio. La dirección de propagación y el periodo son datos adicionales del oleaje. En general, la variable que brinda mayor información del estado del mar es  $H_s$  debido a que da una idea de que tan severo es el oleaje. Cuando el sensor es unidimensional, como es el caso de las boyas,  $\eta(t)$  hace referencia a la elevación de la superficie a lo largo del tiempo en el punto específico donde se encuentra ubicado el sensor. En los sensores que abarcan una cobertura

bidimensional,  $\eta(r, t)$  hace referencia a la elevación de la superficie en la región  $r = (x, y)$ .

## 4. ESTADO DEL ARTE

### 4.1. Sensado remoto del mar a través de radares banda X

Los primeros trabajos para extraer variables del océano vía radares empiezan con la investigación en [18]. En ésta, se explica la interacción entre la señal RF del radar y la superficie del océano. Se encontró que los radares de banda X son capaces de sensar el oleaje debido a las olas capilares producidas por el viento, cuyo número de onda es comparable con la longitud de onda del radar. Posteriormente en [13] y [17] se propusieron los primeros métodos para extraer características del océano a partir de intensidades de radar. En la primera, el autor plantea los diferentes componentes que se encuentran en el *clutter* marino. En la segunda, el autor muestra la relación entre el espectro tridimensional del oleaje y el del radar. Desde entonces se han planteado diversas metodologías para el sensado remoto del mar usando radares como las reportadas en [19], [20] donde se extraen la energía, dirección y corriente del oleaje. Sin embargo, no se había planteado la extracción de la altura significativa.

En [21] se propone usar la relación señal a ruido (SNR) de secuencias de imágenes de *clutter* para hallar  $H_s$ . El autor plantea una relación lineal entre  $H_s$  y la raíz cuadrada de la SNR. Esta relación es hecha mediante una regresión lineal entre la  $H_s$  medida por un sensor *in situ* y la SNR recibida por el radar. Lo anterior implica un proceso de calibración comparando la SNR con el sensor *in situ*. En [22] se propone un método para la extracción de la elevación de la superficie oceánica basado también en la SNR y calibraciones hechas en campo.

Otros trabajos para la reconstrucción de la superficie oceánica a partir de imágenes de radar han sido reportados en [23]–[25]. En ellos se realiza un procedimiento matemático donde se extraen las características geométricas de la superficie. Luego, aplicando procesos de filtrado, se logra la reconstrucción de la superficie. Sin embargo, se desprecian los efectos de las componentes de sombreado e hidrodinámicos en la señal de *clutter* para poder aplicar el procedimiento anterior. Este último supuesto es válido debido a la forma en que se hizo la adquisición de los datos. Para las anteriores investigaciones, se ubicó el radar en plataformas petroleras a más de 50 m de altura sobre la superficie oceánica. A una altura superior a los 50 m se pueden despreciar los efectos del sombreado. La principal ventaja de estas técnicas es que no requieren calibración con medidas *in situ*.

También han sido reportados métodos para la reconstrucción de otras variables como la velocidad del viento [26], [27], profundidad del lecho marino [28], topografía de la superficie oceánica [29] y propiedades internas del oleaje [30]. Adicionalmente, existen mejoras a los procedimientos mencionados anteriormente [31], [32]. Por otro lado, estudios realizados por el Grupo de Investigación en Telecomunicaciones y Señales de la Universidad del Norte han mostrado resultados en la construcción de un sensor remoto de oleaje en el Caribe colombiano [2], [33].

#### **4.2. Efectos del sombreado y otros factores electromagnéticos**

La reconstrucción de las variables oceánicas se basa, en muchos casos, en el supuesto que las intensidades recibidas están levemente afectadas por el efecto de sombreado. Son pocos los estudios que se han realizado para analizar el efecto del sombreado en la reconstrucción de variables oceánicas. Resultados como los expuestos en [34], [35] han mostrado mediante simulaciones algunos de estos efectos. Los anteriores

trabajos mostraron que las alturas reconstruidas con un ángulo de incidencia bajo, siguen la tendencia de la superficie simulada con un aumento en el error relativo. Sin embargo, los autores de los anteriores artículos sugieren que se deben realizar más estudios debido a que, por complejidad de los algoritmos de simulación, muchos factores no fueron tenidos en cuenta. Uno de estos factores es la relación espacio-temporal. Únicamente se simuló un solo rayo de un barrido completo de la imagen polar de *clutter* debido a las limitaciones computacionales de simular cada uno de los rayos que hacen parte de un barrido completo. Por lo anterior, no se utilizaron filtros bidimensionales para la reducción del error.

En la literatura se ha encontrado una ausencia de estudios con datos tomados en campo de la influencia del sombreado en la reconstrucción de variables oceánicas vía radar. Las simulaciones mencionadas sólo consideran un perfil unidimensional del radar. El uso de datos reales brinda la posibilidad de tener un barrido completo de la superficie. Con un barrido bidimensional, el uso de filtros que involucren relaciones espacio-temporales podría ser incluido para el aumento de la precisión en la reconstrucción de las variables. Lo anterior motiva el estudio de la reconstrucción de variables con datos reales de radares ubicados a alturas inferiores a 50 metros y la implementación de técnicas para reducir el error.

## 5. Descripción Detallada de la solución implementada

### 5.1. Obtención de datos

Los datos utilizados para esta investigación fueron tomados el 11 de abril de 2013 en la azotea del Castillo de Salgar en Puerto Colombia – Atlántico. Se utilizó un radar náutico de 22kW el cual cuenta con una etapa de adquisición, transducción y digitalización desarrollada por miembros del Grupo de Investigación en Telecomunicaciones y Señales de la Universidad de Norte. En la Figura 5.1.1 se muestra el esquema empleado para la adquisición de los datos. Los datos fueron tomados ubicando el radar a una altura aproximada de 20 m.

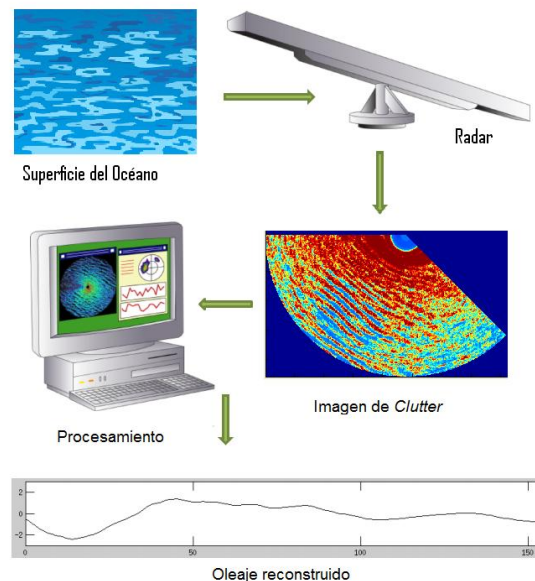


Figura 5.1.1. Esquema de adquisición y procesamiento de la imagen de *clutter* marino

En la Figura 5.1.2 se muestra la instalación de los equipos de sensado y en la Figura 5.1.3 su ubicación en Google Maps®. La antena del radar gira a 48 r.p.m. por lo cual la frecuencia de muestreo de la superficie viene dada:

$$f_s = \frac{48 \text{ r.p.m.}}{60 \text{ seg}} = 0.8 \text{ Hz} \quad (5.1)$$

Es decir, cada  $\frac{1}{0.8} \text{ s} = 1,25 \text{ s}$  se toman datos de un mismo lugar de la superficie.



Figura 5.1.2. Instalación de los dispositivos de adquisición en la azotea del Castillo de Salgar



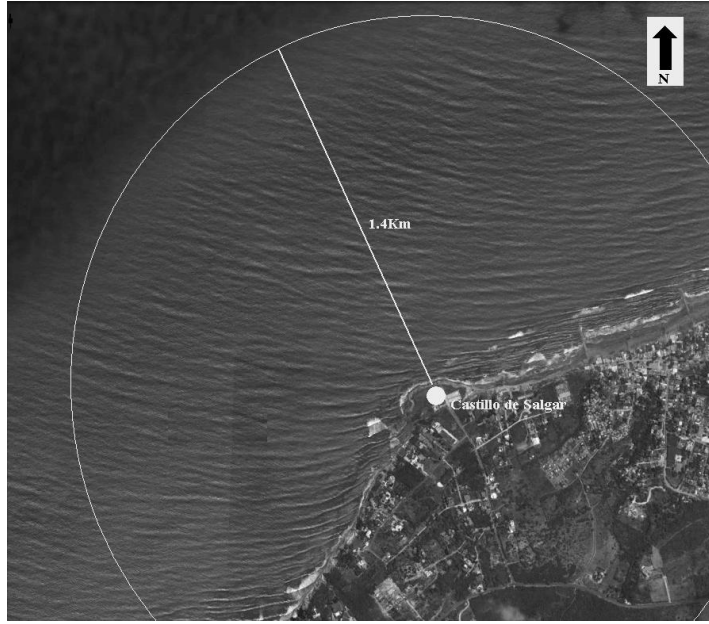


Figura 5.1.3. Georeferenciación de los sensores; Castillo de Salgar: 11°2'8.39 N, 74°56'48.88 O; Ecosonda: 11°2'8.39 N, 74°56'48.88 O

La frecuencia de muestreo del ADC brinda la resolución espacial de la imagen de *clutter*. El sistema adquisición usado cuenta con una etapa ADC cuya frecuencia de muestreo es de 25 MSPS (Mega muestras por segundo). La resolución espacial de la imagen de *clutter* viene dada por la ecuación (3.1). Por lo cual, remplazando valores tendríamos:

$$\Delta R = \frac{C}{2f_{ADC}} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{2 \times 25 \text{ MHz}} = 6\text{m} \quad (5.2)$$

Luego, la resolución espacial de la imagen de *clutter* es de 6m. En la Figura 5.1.4 se muestra una imagen de *clutter* adquirida.

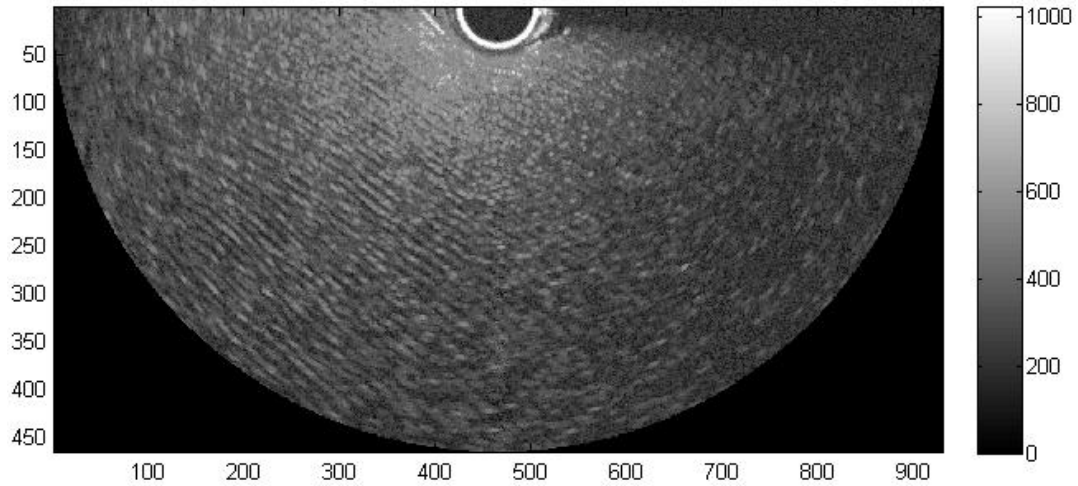


Figura 5.1.4. Imagen de *clutter* marino, cada pixel corresponde a una región de  $6m \times 6m = 36 m^2$ , la escala de grises viene dada por los valores de cuantización de la señal de radar (10bits = 1024 valores)

Se instaló una ecosonda (sensor *in situ*) a 1100 m. del punto de la costa donde fue ubicado el radar. La ecosonda mide la distancia de la superficie al fondo del mar. La frecuencia de muestreo del sensor es de 1 *Hz*. La ecosonda en realidad mide la posición vertical de la embarcación donde fue instalada. En la Figura 5.1.5 se muestra una gráfica de los datos arrojados por la ecosonda a través del tiempo.  $H_s$  es hallada aplicando la fórmula (3.11). El procedimiento planteado por la anterior fórmula es válido para los valores de profundidad de la ecosonda debido a que se basa en la desviación estándar de la altura de la superficie a través del tiempo. Es decir, la ecosonda mide profundidad; sin embargo, esta medida se traduce en altura al restarle la media a los datos. Lo cual es tenido en cuenta en el cálculo de la varianza. Lo anterior introduce errores en la medición. Sin embargo, este esquema de sensado es válido para la extracción de  $H_s$  [36].

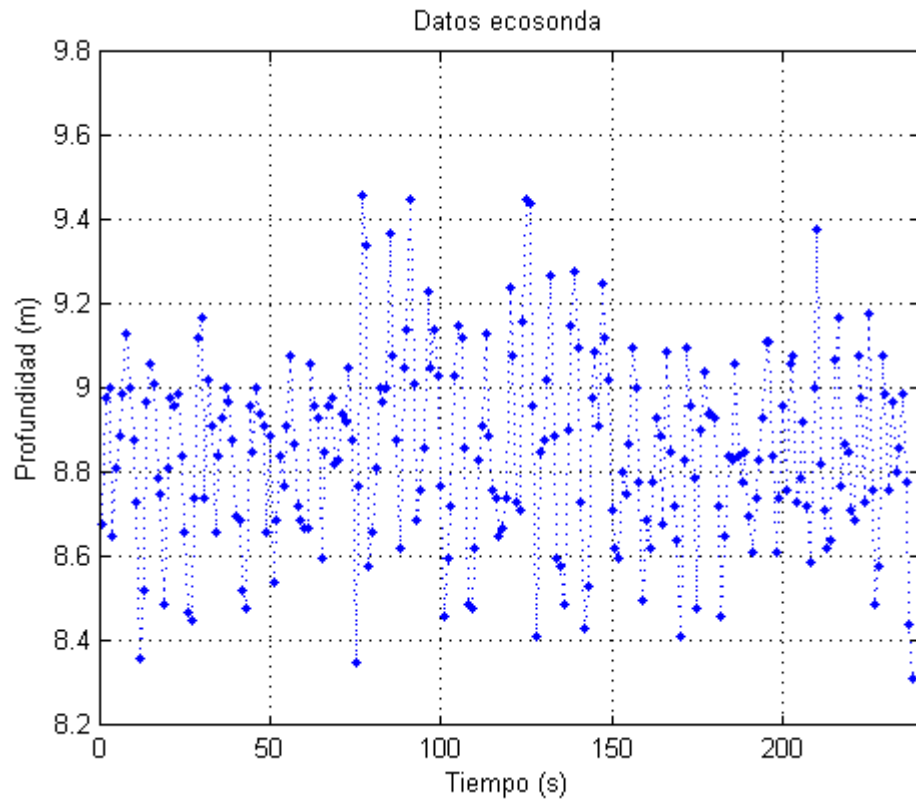


Figura 5.1.5. Mediciones de la ecosonda

## 5.2. Algoritmos de extracción de variables utilizados

El método utilizado para la reconstrucción de la superficie del océano fue el reportado en [25]. Se escogió este método principalmente porque no necesita calibración. Debido a esto, no se necesita instalar elementos *in situ* adicionales para la extracción de las variables del océano. El método se basa en la comparación de los valores de intensidades con respecto a su media, asignándole un valor de inclinación más elevado a medida que se aleja el nivel de intensidad de su valor esperado. De esta manera se compensa la atenuación del radar con respecto al rango. En la Figura 5.2.1 se muestra el diagrama de flujo del método.

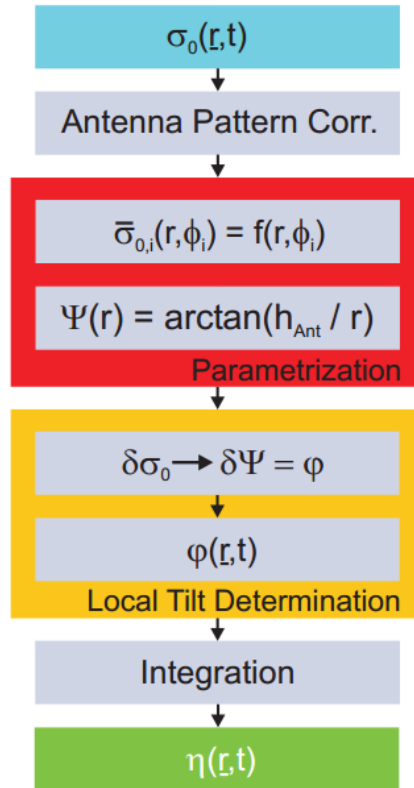


Figura 5.2.1. Diagrama de flujo del método utilizado para la reconstrucción de la superficie [27]

Donde  $\sigma_0$  corresponde al valor de RCS recibido por el radar para una región  $P_0$ . A continuación se explica el funcionamiento del método para la reconstrucción de la superficie a partir de las intensidades del radar.

1. **Corrección patrón de antena:** El proceso de corrección del patrón de antena consiste en hallar el promedio temporal de una secuencia de imágenes de radar. Mediante el cálculo de la transformada de Fourier en dos dimensiones, se elimina la componente cero del espectro. La imagen producto del anterior proceso es restada a cada una de las imágenes de *clutter* de la secuencia que se esté procesando.
2. **Parametrización:** este proceso busca caracterizar el promedio temporal de cada rayo de la imagen polar de *clutter*. La parametrización del RCS promedio ( $\bar{\sigma}$ ) se hace rayo a rayo usando una aproximación polinómica de tercer orden. También se halla el ángulo  $\tilde{\Psi}$  al cual el radar incide sobre la superficie si ésta fuera completamente llana. El ajuste polinómico para un rayo puede apreciarse en la Figura 5.2.2.

$$\tilde{\Psi}(r) = \arctan \frac{h_{ant}}{r} \quad (5.3)$$

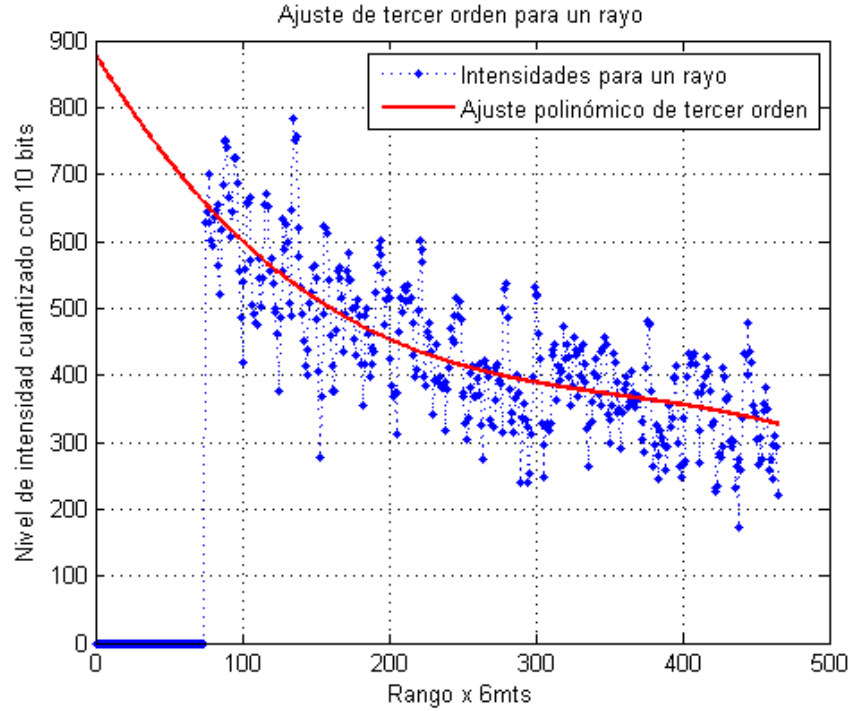


Figura 5.2.2. Ajuste del promedio de un rayo mediante polinomio de tercer grado.

El eje X está normalizado con respecto a la resolución espacial (6m.). El eje Y equivale a los valores de intensidad cuantizados con 10 bits por el ADC

Mediante estas dos funciones, el ajuste polinómico  $f_{\bar{\sigma},i}(r, \phi_i)$  para cada rayo  $\phi_i$  y el ángulo de incidencia o de depresión  $\tilde{\Psi}(r)$ , se plantea una regresión para calcular el ángulo de inclinación de la superficie a partir del valor de RCS recibido.

**3. Obtención del ángulo de inclinación de la superficie:** una desviación local del nivel de RCS en un punto ( $\delta\sigma$ ) con respecto al promedio o valor esperado de RCS ( $\bar{\sigma}$ ) es causado por la inclinación ( $\Phi(\vec{r})$ ) de la superficie en dicho punto [25]. Esta inclinación es hallada realizando una regresión sobre los valores de intensidad. Para un valor de intensidad recibido  $\sigma_0$ , el rango al cual debería “en promedio” pertenecer este valor es hallado mediante una regresión sobre el polinomio  $f_{\bar{\sigma},i}(r, \phi_i)$ . En la Figura 5.2.3 se

ilustra este procedimiento. Luego, con el valor de rango esperado  $f_{\bar{\sigma},i}^{-1}(\sigma_0, \phi_i)$ , la desviación del ángulo de incidencia del radar  $\delta\Psi$  sobre la superficie con respecto al esperado es calculado remplazando en la ecuación (5.3). En la Figura 5.2.4 se ilustran los ángulos en cuestión.

La inclinación de la superficie se halla restando el ángulo  $\Psi_1$  al de incidencia del radar  $\tilde{\Psi}(r_0)$  si la superficie fuera plana:

$$\Phi(r_0, \phi_i) = \delta\Psi = \Psi_1(r_0, \phi_i) - \tilde{\Psi}(r_0) \quad (5.4)$$

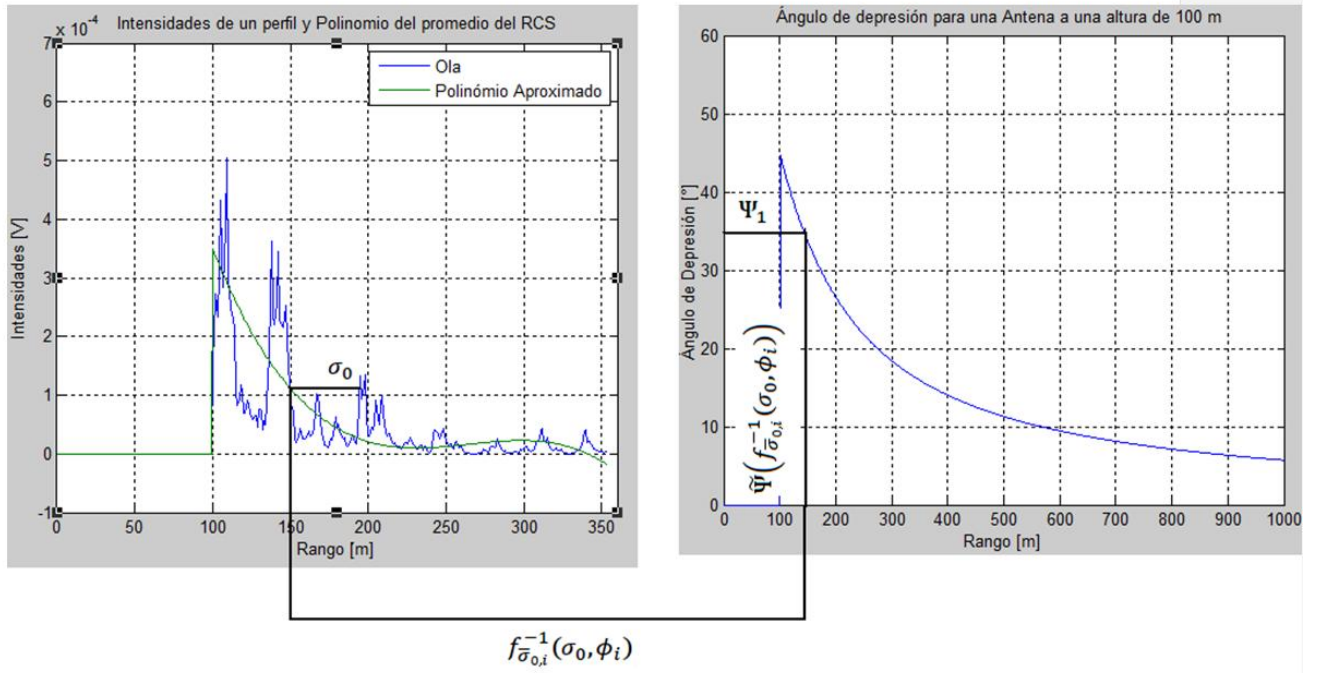


Figura 5.2.3. Ilustración del proceso de cambio de intensidades a ángulo de inclinaciones

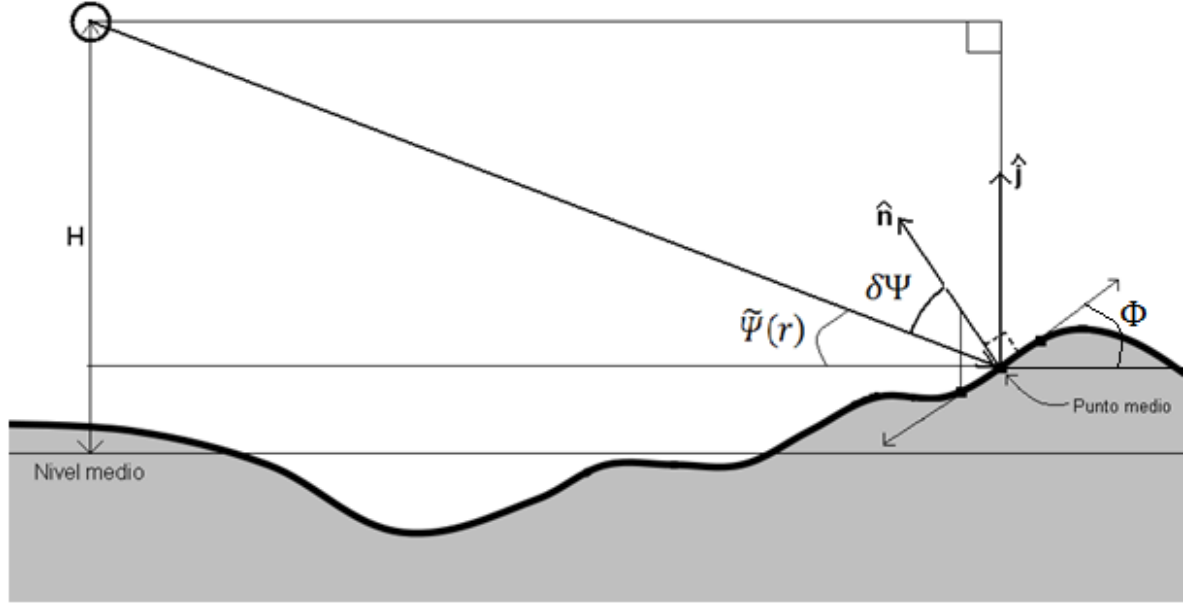


Figura 5.2.4. Ilustración de ángulos

- 4. Integración:** La superficie del océano puede ser reconstruida integrando los ángulos de inclinación de la superficie  $\Phi(\vec{r}, t)$ . Este proceso es llevado a cabo en el dominio espectral multiplicando la transformada de Fourier de las inclinaciones por la respuesta espectral de un filtro integrador y luego aplicando transformada inversa.

$$\hat{D} = ik^{-1} |\cos(\phi_W - \phi_A)|^{-1} \quad (5.5)$$

Donde  $k$  corresponde al módulo del vector de número de onda  $\vec{k}$ ,  $\phi_W$  el ángulo de dirección de propagación del oleaje y  $\phi_A$  el ángulo del radar. La superficie oceánica  $\eta$  es hallada de la siguiente manera:

$$\hat{\eta} = \Phi(\vec{k}, \omega) \cdot \hat{D} \Rightarrow \eta = \text{ifft2}(\hat{\eta}) \quad (5.6)$$



Luego del anterior procedimiento se realiza un proceso de filtrado utilizando la relación de dispersión mostrada en la ecuación (3.8). También se aplican filtros de tipo Gabor para dejar sólo aquellas componentes que hacen parte del oleaje.

### **5.3. Limitaciones de los algoritmos, efecto de sombra**

Los datos tomados para esta investigación se adquirieron ubicando el radar a una altura de aproximadamente de 20 m. Por esto, el ángulo de incidencia del radar fue bajo. Debido a lo anterior, los datos adquiridos se encuentran afectados por el efecto de sombreado. En la Figura 5.3.1 se muestran las intensidades adquiridas por el radar a lo largo de un rayo. El rango se encuentra normalizado con respecto a la resolución espacial del radar. Es decir, cada unidad en el rango equivale en realidad a un desplazamiento  $\Delta R = 6m$ . Encerradas en el óvalo se pueden apreciar intensidades con valores bajos atribuidos al efecto de sombreado.

Cuando una zona es ensombrecida, el radar no recibe señal de eco de dicha región. En este caso, lo único que procesa el radar es ruido. Por lo cual, se le asigna un nivel de intensidad bajo a las zonas ensombrecidas. Debido a esto, se le atribuyen los bajos niveles de intensidades que se encuentran en el óvalo al efecto de sombreado. Estos valores de intensidad baja afectan al procedimiento de extracción de la superficie anteriormente explicado. En esta investigación se remplazaron los puntos afectados por el sombreado por valores interpolados. De esta manera se busca reducir el efecto del sombreado en los datos y mejorar la precisión en la reconstrucción de la superficie oceánica.

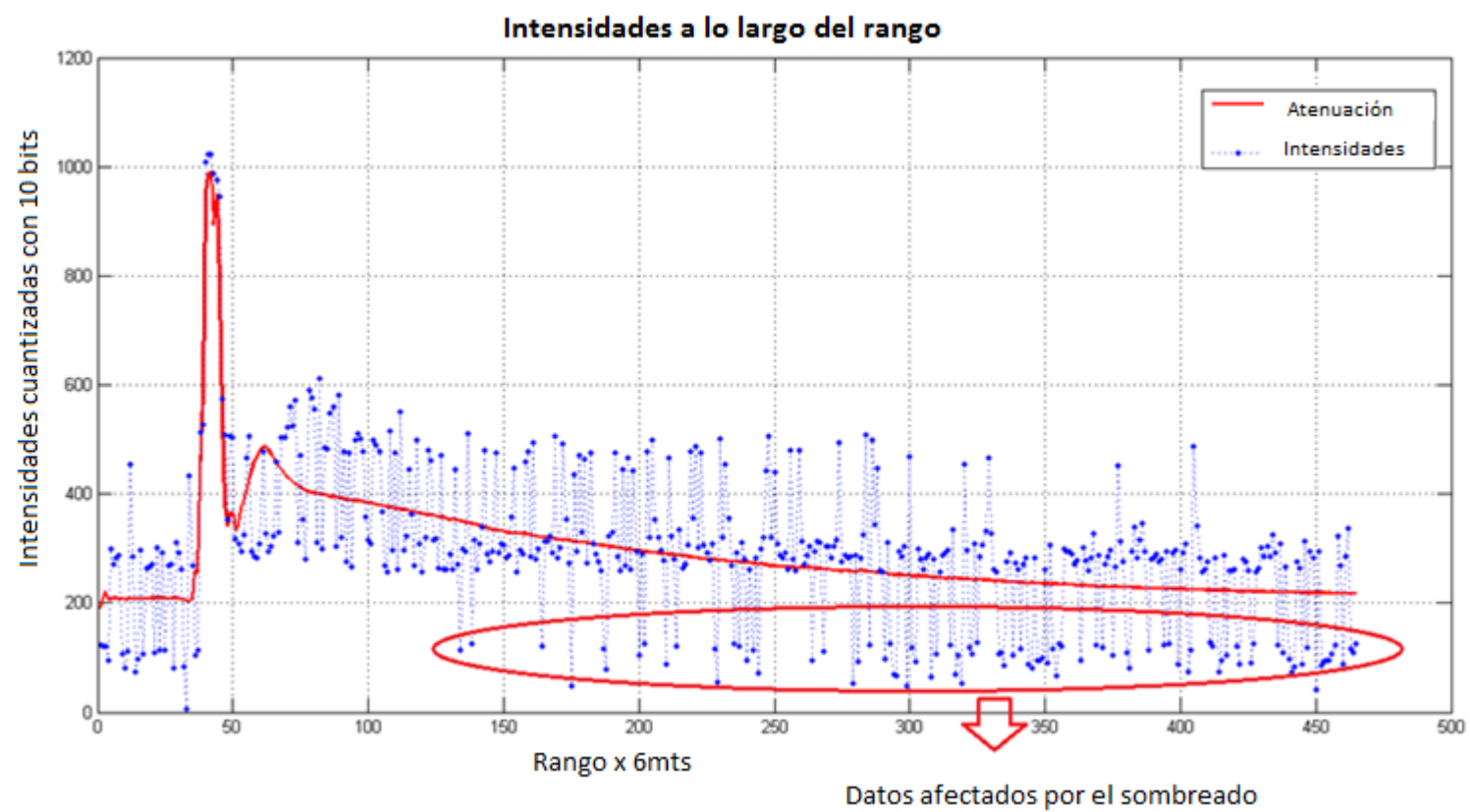


Figura 5.3.1. Información de intensidades a lo largo de un rayo del radar asociadas al sombreado

En la Figura 5.3.2 se muestra la imagen umbralizada del *clutter* marino. Se les asignó un valor de uno a aquellos niveles de intensidad mayores a 350 y cero a los menores. Los valores de intensidad son cuantizados con 10 bits, por lo cual se tienen 1024 niveles de intensidad. Se puede apreciar la estructura del oleaje en la imagen umbralizada, esto se debe precisamente al efecto de sombreado. Una vez el radar irradia la parte superior de una ola, se ensombrece la parte inferior, obteniendo niveles de intensidades bajos.

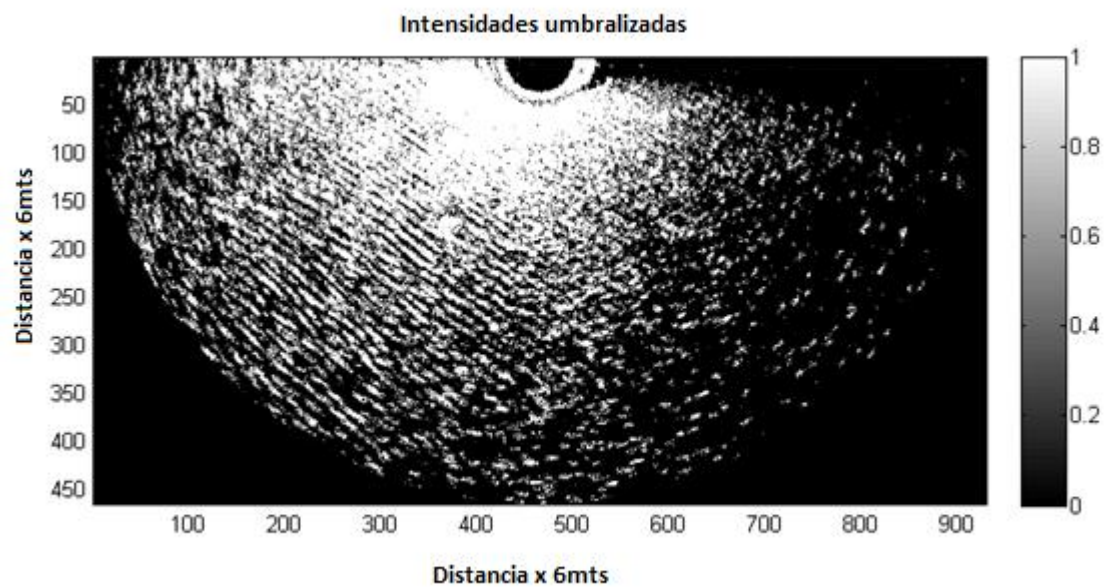


Figura 5.3.2. Imagen de Intensidades umbralizadas, en blanco valores mayores a 350 y en negro los menores

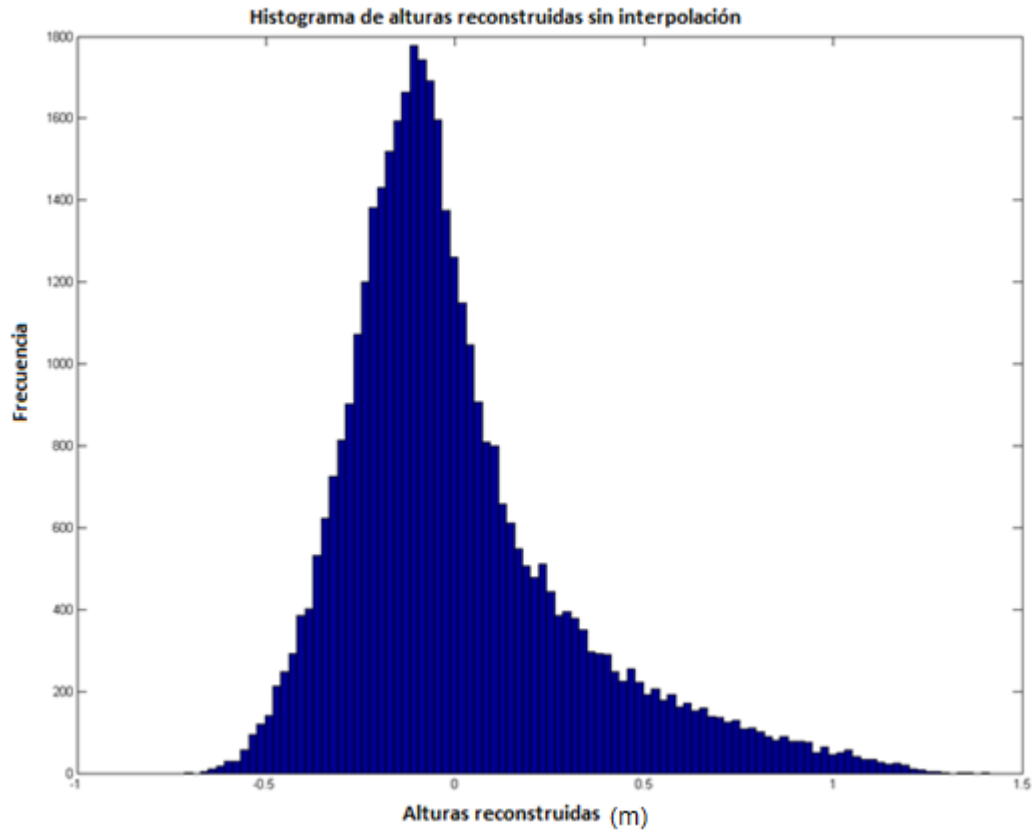


Figura 5.3.3. Histograma de alturas reconstruidas sin incluir mejoras de interpolación

En la Figura 5.3.3 se muestra el histograma de las alturas reconstruidas sin incluir la interpolación propuesta. Según [14], la distribución de la superficie del océano debe ser normal. Vemos que el histograma de las alturas reconstruidas presenta un sesgo hacia la parte negativa. Lo anterior es atribuido al efecto que el sombreado tiene en la reconstrucción de la superficie oceánica. Debido a que parte de la superficie es ocultada, se le asigna intensidades bajas a estas zonas. Los algoritmos interpretan estas intensidades bajas como elevaciones negativas de la superficie. Esto explica el sesgo de los datos.

## 5.4. Ajustes propuestos a los algoritmos de reconstrucción

Son varios los ajustes planteados en esta investigación a los algoritmos de reconstrucción de la superficie oceánica. Estos ajustes van encaminados a reducir el error en las variables reconstruidas. Se busca hallar los valores de rango y ángulos para los cuales las intensidades recibidas corresponden al *clutter* marino y no a fenómenos de dispersión tales como el patrón de la antena y la zona muerta producida por medidas en un rango cercano. A continuación se explican dichos ajustes:

**1. Ajustes del rango:** Las mediciones de radar en un rango cercano se ven afectadas por intensidades que no hacen parte de la señal de *clutter* marino. Intensidades producidas por los lóbulos laterales de la antena y objetos cercanos generan señales de eco que se mezclan con la de *clutter* y evitan que pueda ser percibido. Estos fenómenos tienen mayor prevalencia en un rango cercano. A medida que nos alejamos en el rango, la señal de *clutter* se ve menos afectada por los anteriores factores.

En la Figura 5.4.1 se muestra la curva promedio de intensidades recibidas por el radar en función del rango. Se puede apreciar la zona muerta, caracterizada por niveles de intensidades bajos, al comienzo de la curva. Estos niveles se extienden hasta un rango aproximado de 40 en el eje normalizado. Luego, se aprecian niveles de intensidades altos que no hacen parte la señal de *clutter*. Los niveles de intensidades empiezan a mostrar una atenuación continua a lo largo del rango a partir del valor 74 en el eje X normalizado. Las intensidades de radar deben mostrar en promedio una atenuación estable a lo largo del rango de acuerdo a la ecuación (3.6) de radar.

$$R = 74 \times 6 \text{ m} = 444 \text{ m} \quad (5.7)$$

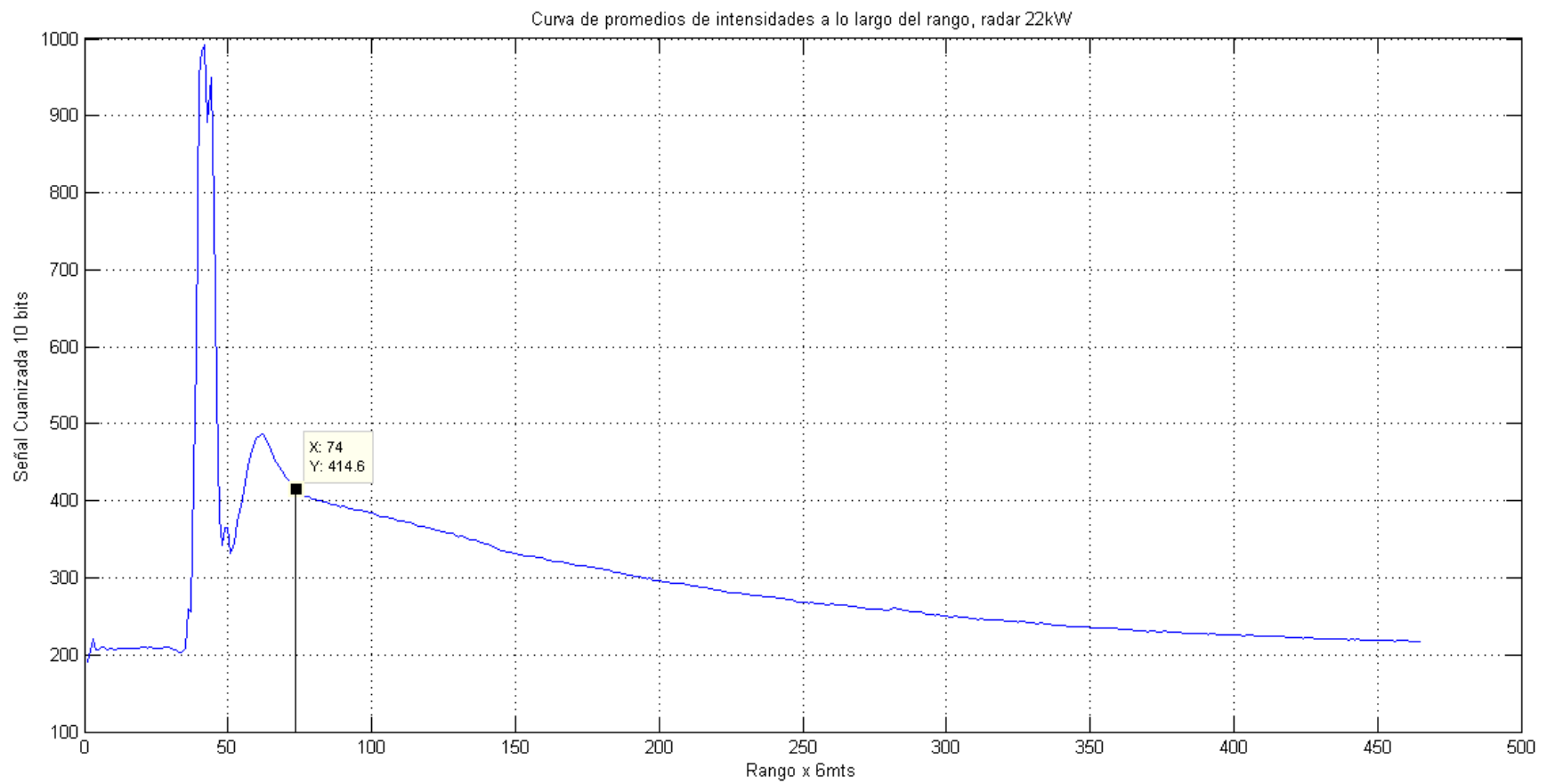


Figura 5.4.1. Curva promedio de intensidades para un rayo a lo largo del rango

**2. Ajuste del ángulo:** Debido a fenómenos de propagación, el radar sólo capta las olas a través de los rayos que se propagan en una dirección similar a la del oleaje [21]. Por esto, fue necesario elaborar un algoritmo que encontrara, a partir de las intensidades del radar, cuál era la dirección del oleaje. La validación de la dirección del oleaje únicamente se puede hacer visualmente debido a que se necesitan boyas especializadas para conocer la dirección exacta del oleaje. A continuación se explica el funcionamiento del algoritmo desarrollado en esta investigación para tal fin.

El algoritmo se basa en el hecho que el radar capta mejor el oleaje cuando la dirección de propagación del pulso del radar es la misma que la del oleaje. Debido a que la relación señal a ruido se encuentra relacionada directamente con la intensidad del oleaje y ésta con la varianza, se asume que a mayor varianza en un rayo, menor la diferencia entre la dirección de propagación de la onda del radar y el oleaje.

Al anterior supuesto se le añade otra condición: la totalidad de la imagen debe corresponder a señales de *clutter*. Si hay intensidades de naturaleza diferente, puede que la mayor varianza se dé en dichas intensidades. En la Figura 5.4.2 se evidencia la importancia de la anterior condición. Se aplicó el algoritmo a una secuencia de imágenes donde únicamente la mitad de cada imagen correspondía a *clutter* marino. La otra mitad correspondía a playa y edificaciones. En Figura 5.4.2.b. el rayo señalado indica el de mayor varianza. Se evidencia que el rayo detectado con mayor varianza no corresponde a la zona de intensidades del mar. Restringiendo la zona a procesar a aquella cuyas intensidades provengan del mar, se obtuvo el rayo con mayor varianza mostrado en la Figura 5.4.2.c.

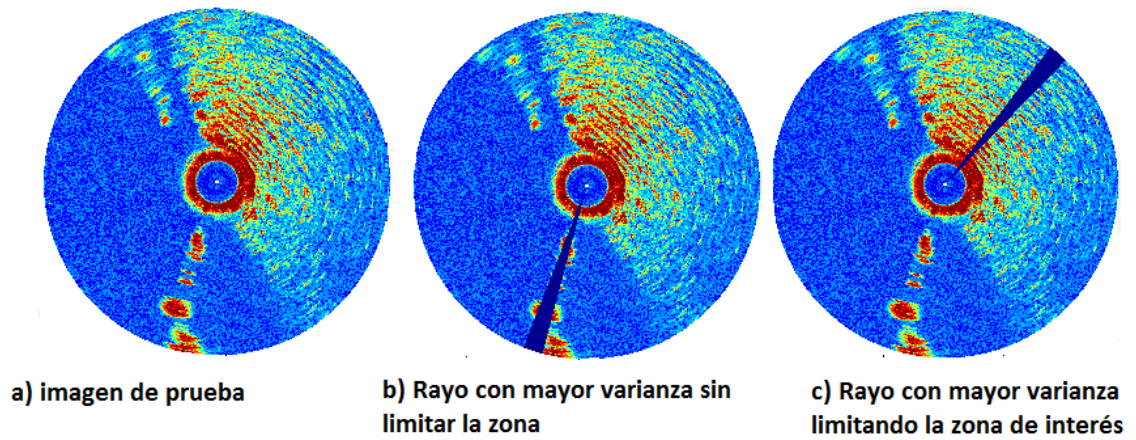


Figura 5.4.2. Imagen de radar a la que se le aplicó algoritmos de detección de dirección del oleaje.

La información de la dirección de propagación del oleaje es utilizada para extraer la porción de la imagen a procesar por los algoritmos reportados. En la Figura 5.4.3 se muestra dicha porción. En la Figura 5.4.4 se muestra el diagrama de flujo del anterior algoritmo.

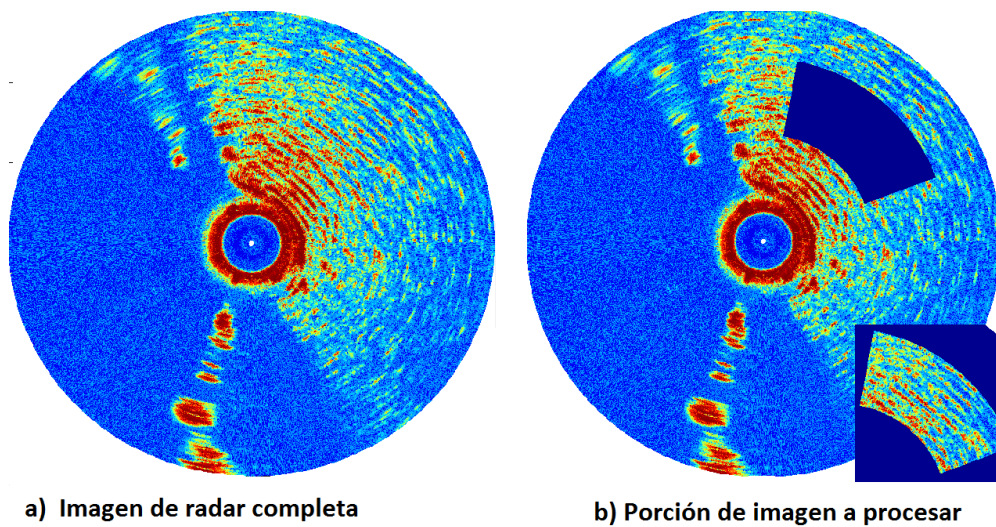


Figura 5.4.3. Porción de imagen a procesar



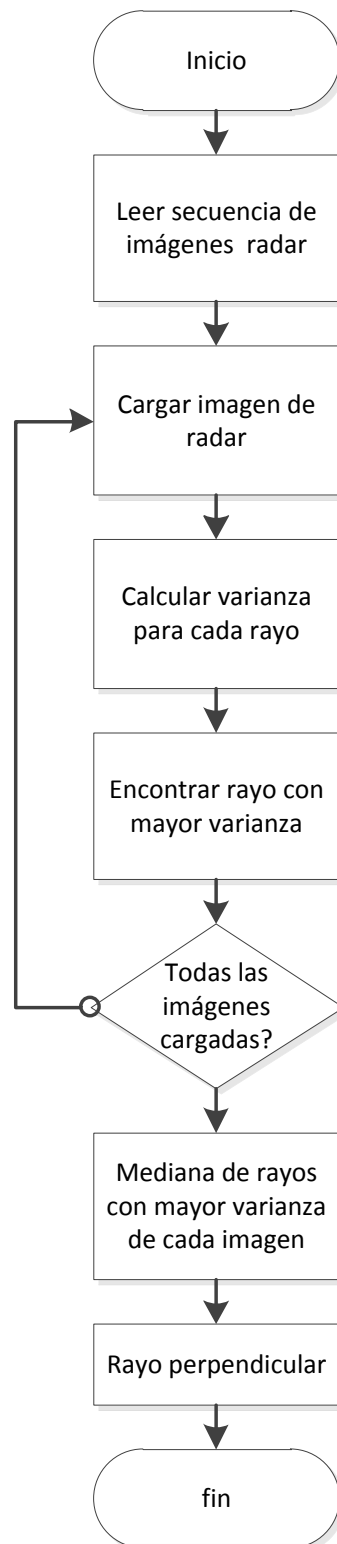


Figura 5.4.4. Diagrama de flujo del algoritmo de detección de dirección de propagación del oleaje

Nótese que un barrido del radar empleado en este proyecto utiliza 1580 rayos. Sin embargo, para la determinación de la dirección del oleaje, se utilizaron solamente 520, correspondientes a los que se muestran en la Figura 5.4.2.b. Para este ejemplo, se obtuvo una dirección  $50^\circ$  con respecto al norte.

## 6. IMPLEMENTACIÓN DE ALGORITMOS

### 6.1. Ajuste de los parámetros RF del radar

Uno de los parámetros ajustable del radar es la sintonización o *tuning* la cual compensa la atenuación de la señal a lo largo del rango. El sistema de radar utilizado posee una configuración automática y otra manual de sintonización. En la Figura 6.1.1 puede verse una imagen de *clutter* obtenida con configuración automática y en la Figura 6.1.2 una con configuración manual. En las imágenes puede apreciarse la pérdida de componentes del oleaje en la configuración automática. Debido a esto se descartaron las imágenes obtenidas bajo esta configuración automática.

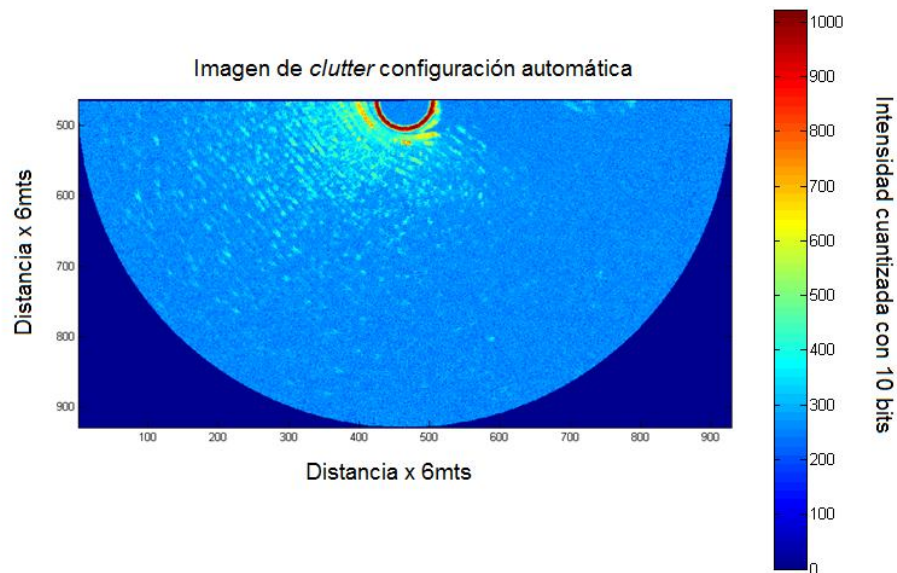


Figura 6.1.1. Imagen de *clutter* adquirida con configuración automática de sintonización

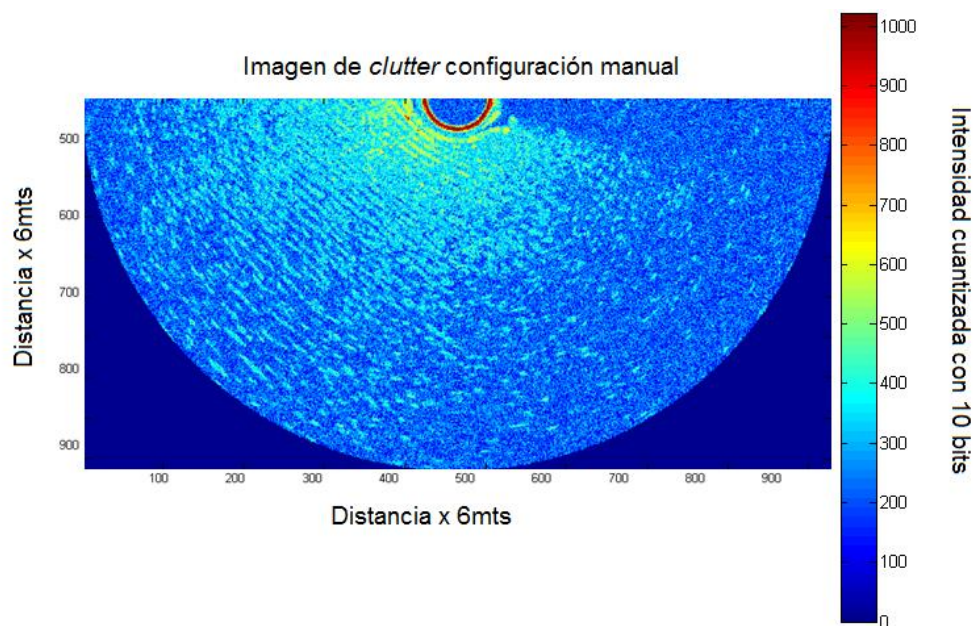


Figura 6.1.2. Imagen de *clutter* con configuración manual de ganancia igual a 2200

No sólo la configuración del radar afecta los datos a procesar. También, como se ha mencionado, la ubicación o la región donde son tomados los datos. En un rango lejano, los datos del radar se ven significativamente afectados por el efecto de sombreado. También la ubicación angular aumenta o disminuye las componentes del oleaje de los datos adquiridos.

El procesamiento del *clutter* se implementó para aquellas zonas que brindaran un buen rendimiento en función del error relativo con los datos arrojados por la ecosonda. Se procesaron regiones rectangulares de diferentes tamaños que contuvieran el rayo perpendicular al de la dirección de propagación del oleaje. El siguiente paso es hallar la región que mejor reconstruya la altura significativa. Para ello, se llevó a cabo un proceso de variación de factores en búsqueda del tamaño de la región adecuada.

## 6.2. Implementación del método de inclinaciones (*Tilt angle*) [25] para la reconstrucción de la superficie oceánica

El método abordado en la sección 5.5 fue implementado para bloques de 255 imágenes de *clutter*. El proceso de parametrización y cálculo de inclinaciones se realizó para la totalidad de la imagen de *clutter*. El tamaño y la ubicación de la región a procesar fueron hallados mediante un proceso de experimentación que será abordado en el siguiente capítulo. A esta región se le aplicó un proceso de filtrado para la reconstrucción de la superficie marina. En la Figura 6.2.1 se muestra la ubicación de una región de 200 x 200 píxeles. La superficie reconstruida para esta región es mostrada en la Figura 6.2.2.

Se aplicaron dos filtros a las inclinaciones seleccionadas. El proceso de filtrado fue hecho en el dominio espectral, es decir, multiplicando la transformada de Fourier de las inclinaciones por la respuesta espectral de los filtros y luego aplicando transformada inversa.

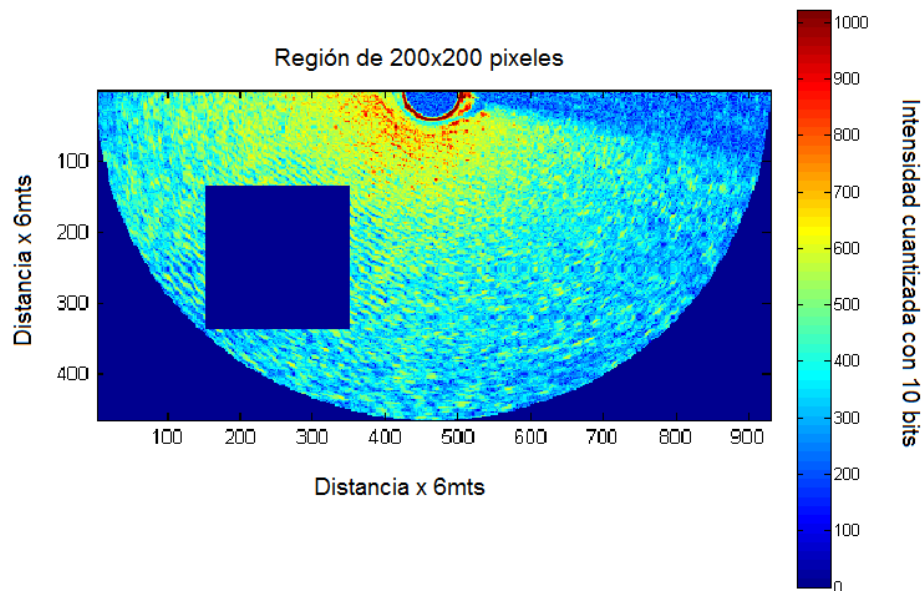


Figura 6.2.1. Región de 200 x 200 píxeles de la imagen de *clutter*

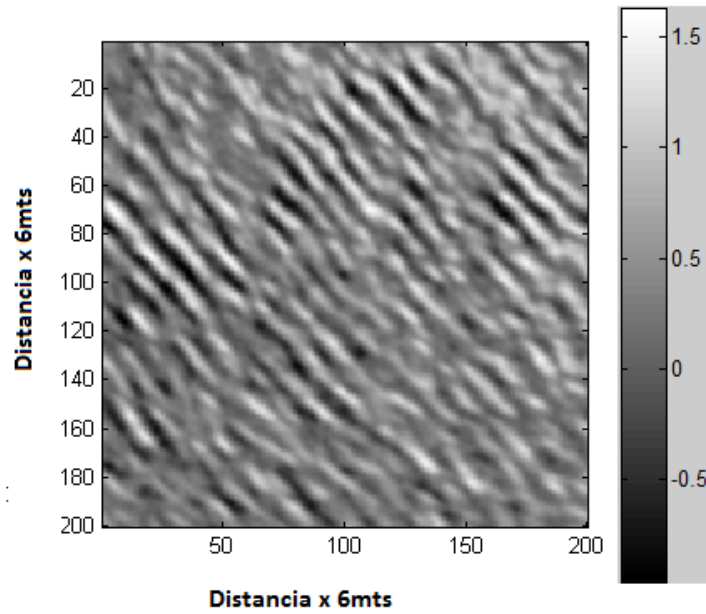


Figura 6.2.2. Superficie reconstruida para una ventana de 200 x 200 píxeles

En la Figura 6.2.3 se muestra el espectro de una imagen de *clutter* para la región de 200x200 píxeles. El espectro bidimensional de una imagen de *clutter* brinda información en número de ondas del oleaje. Es posible calcular la dirección del oleaje mediante los picos de intensidad del espectro. El vector de dirección entre estos picos con respecto al centro de la imagen coincide con la dirección de propagación del oleaje.

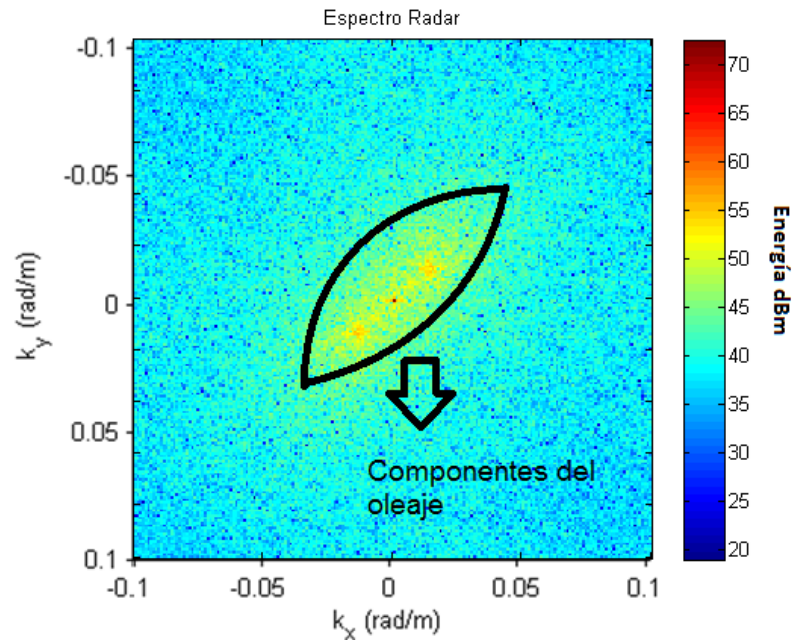


Figura 6.2.3. Espectro de intensidades de la señal de *clutter* sin procesar

En la Figura 6.2.4 se muestra el espectro de las inclinaciones reconstruidas a partir de las intensidades de la imagen anterior. Se puede apreciar un aumento en las componentes de la región comprendida entre los dos picos del espectro de inclinaciones. Esta región corresponde a la zona espectral donde se encuentran las características del oleaje [17], por ende, el método de reconstrucción en el dominio espectral puede verse como un amplificador de las componentes del oleaje.

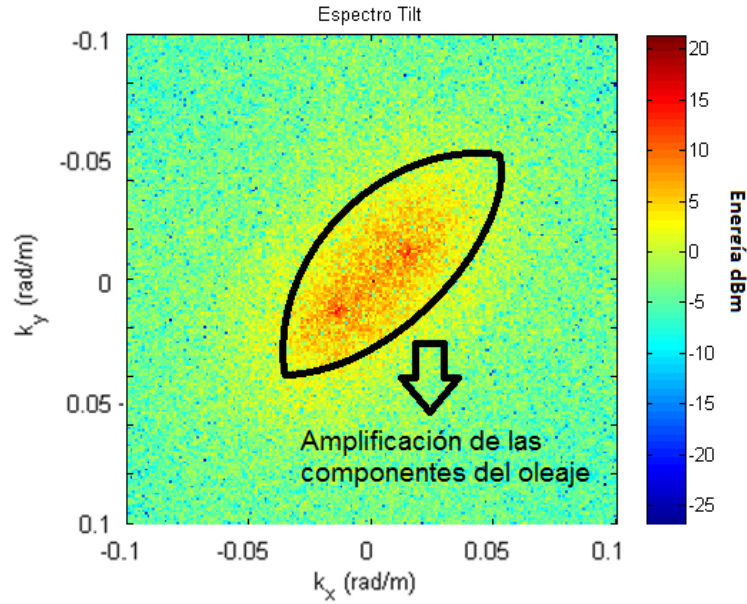


Figura 6.2.4. Espectro de los ángulos de inclinaciones

### 6.3. Proceso de filtrado

Los dos filtros aplicados a la región de inclinaciones fueron uno pasa banda de tipo gaussiano y otro de tipo Gabor. El filtro gaussiano busca eliminar las componentes de bajo número de onda que no pertenecen al oleaje [37] y el filtro Gabor eliminar aquellas que se encuentran por fuera de la región comprendida entre los dos picos de intensidad del espectro [25]. En la Figura 6.3.1 se muestra la respuesta espectral del filtro gaussiano para eliminar las componentes de bajo número de onda. En la Figura 6.3.2 se muestra la respuesta del filtro Gabor utilizado para dejar pasar sólo las componentes que pertenecen al oleaje.



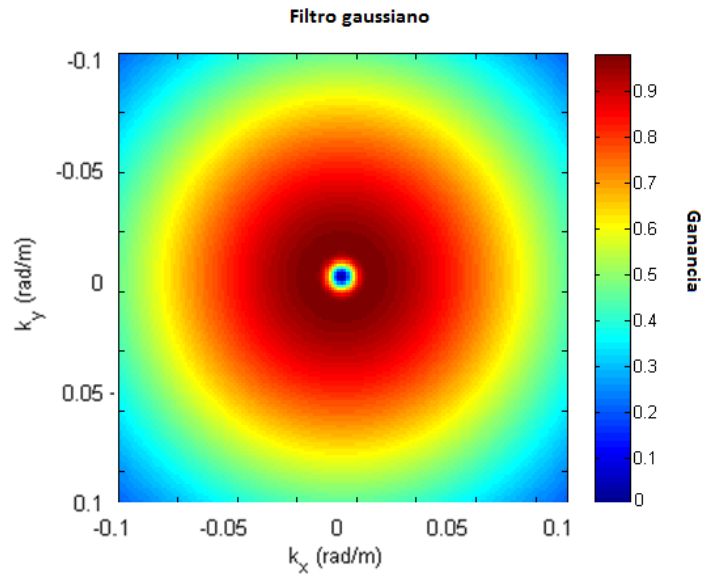


Figura 6.3.1. Respuesta espectral de filtro gaussiano para eliminar componentes de bajo número de onda que no corresponden a características del oleaje

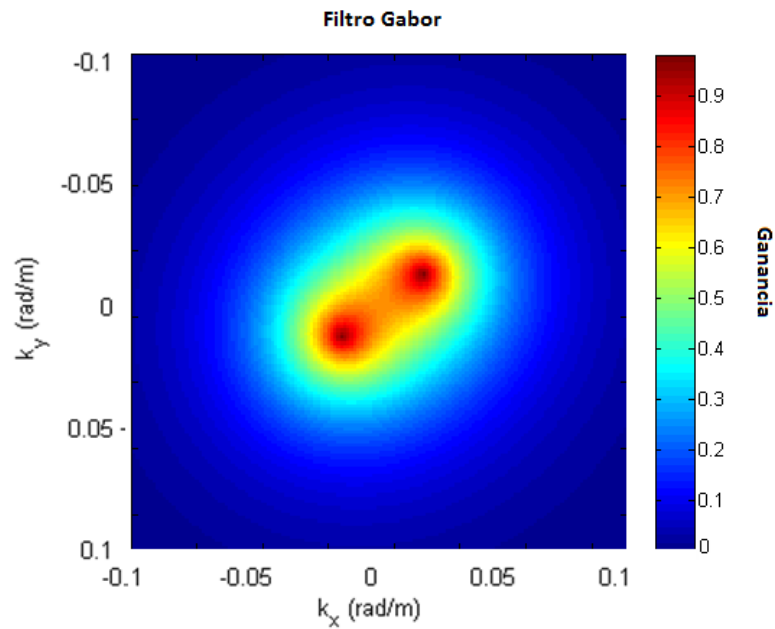


Figura 6.3.2. Respuesta espectral filtro Gabor para dejar sólo las componentes del oleaje

La elevación o altura de la superficie es calculada mediante la integración espacial de la imagen de inclinaciones tal como se explicó en la sección 5.2.4. En la Figura 6.3.3 se muestran las alturas significativas reconstruidas. Se puede apreciar que el método implementado sin filtrado sobre-estima la Hs arrojada por la eco-sonda y presenta datos atípicos. Mientras, la Hs reconstruida con los esquemas de filtrado anteriormente propuestas sub-estima Hs y sigue de una mejor manera la Hs de la ecosonda. Lo anterior es debido a que la Hs es una medida de la dispersión las elevaciones del océano. Al no presentarse proceso de filtrado, el ruido presente fuera de las componentes del oleaje aumenta la dispersión de las inclinaciones y por ende Hs. Al usar los filtros, el sombreado presente en los datos reconstruidos hace que no se tenga información de las zonas ensombrecidas. Por lo cual la dispersión de los datos disminuye y se sub-estima Hs.

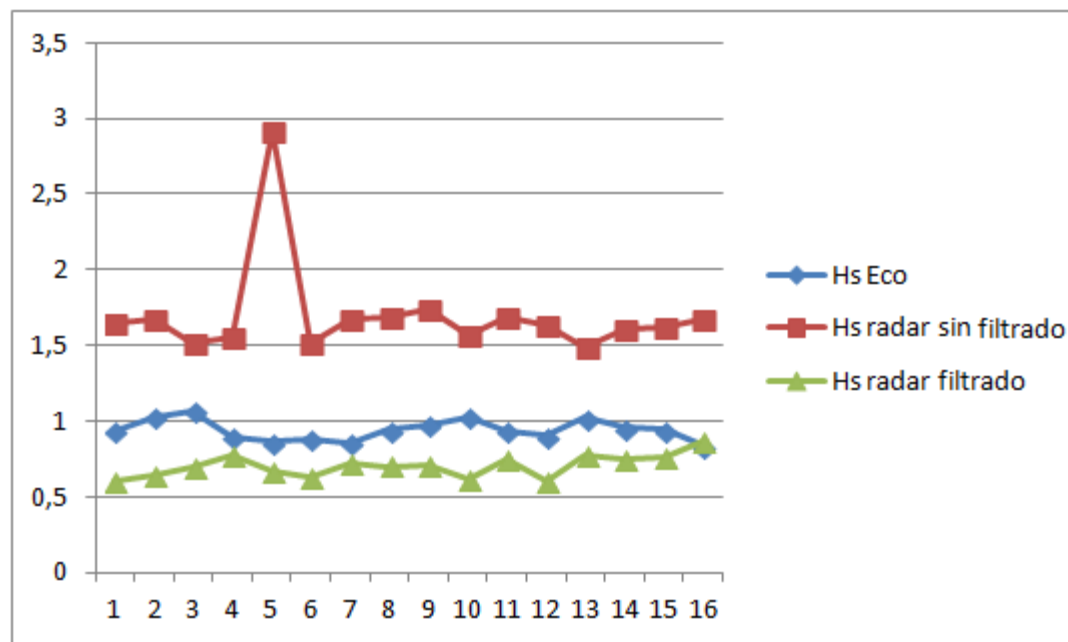


Figura 6.3.3. Alturas significativas reconstruidas

## 6.4. Algoritmo de interpolación para disminuir el efecto de sombreado

Debido al bajo ángulo de incidencia del radar, se utilizó un algoritmo de interpolación lineal para compensar el efecto de sombreado en los datos de intensidades. Los datos con valores de cuantización menores a un umbral dado fueron considerados como sombra y son remplazados por valores interpolados. La escogencia del umbral se realizó mediante experimentación para encontrar un valor apropiado. En la Figura 6.4.1 se ilustra el anterior proceso para un rayo del radar. En la Figura 6.4.2 vemos el proceso de interpolación para datos que se encuentran en un rango cercano. En la Figura 6.4.3 se ilustra la interpolación de los datos para un rango lejano. Se puede apreciar un mejor desempeño de la interpolación para valores del rango cercano. Cuando nos alejamos en el rango, vemos que la interpolación no sigue muy bien la tendencia de los datos.

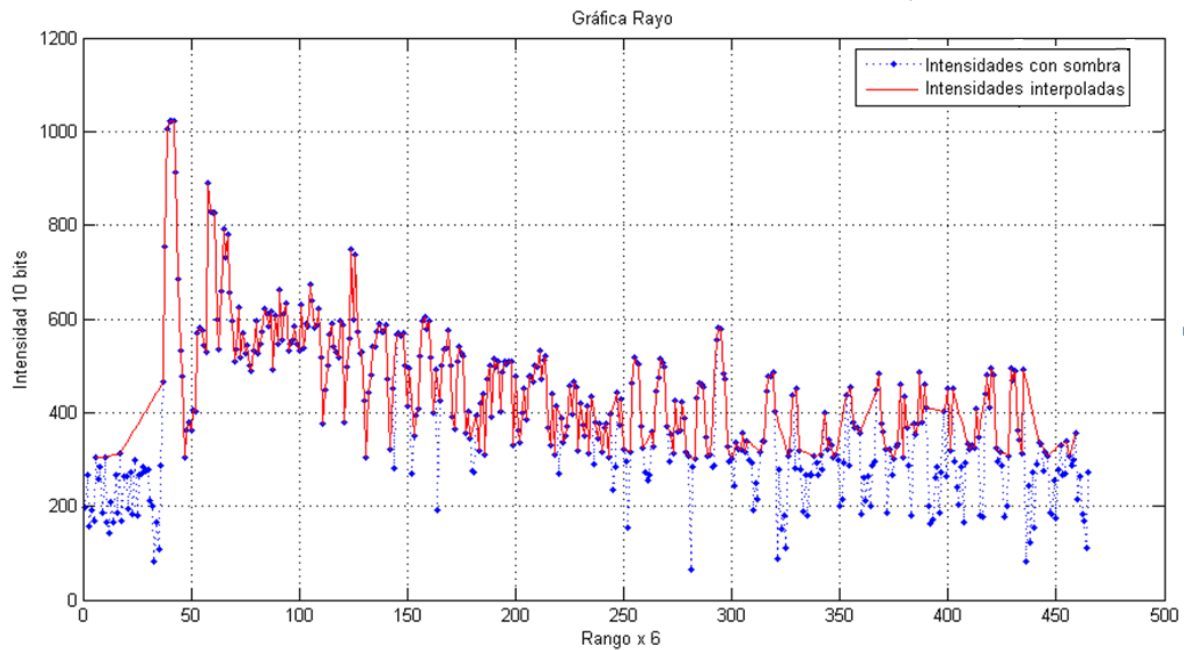


Figura 6.4.1. Interpolación de las intensidades ensombrecidas

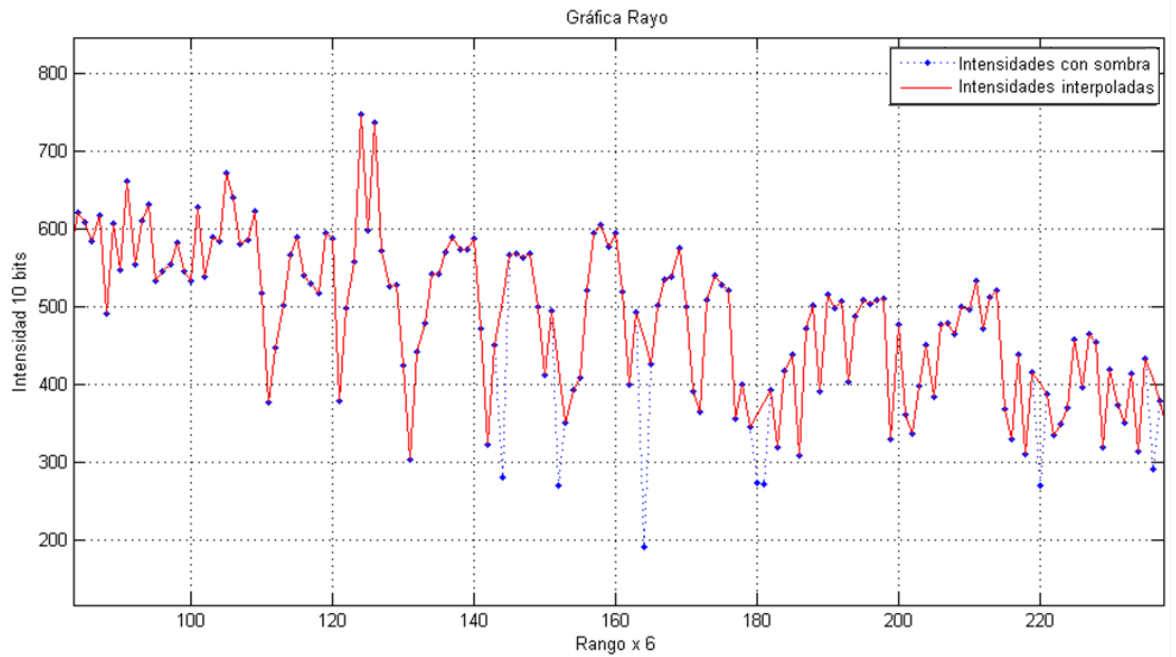


Figura 6.4.2. Interpolación de las intensidades ensombrecidas en un rango cercano

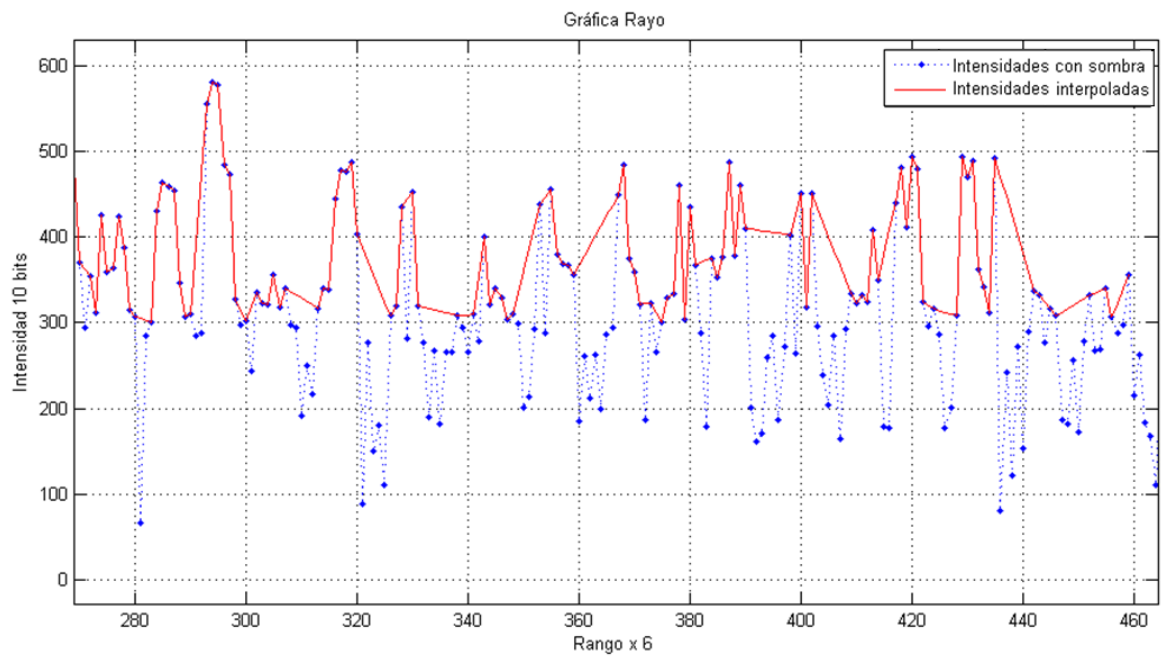


Figura 6.4.3. Interpolación de las intensidades ensombrecidas en un rango lejano

En la Figura 6.4.4 se muestra el ajuste de las alturas reconstruidas a partir de intensidades sin interpolar. Vemos que el histograma de estos valores no es simétrico ni gaussiano como debería ser. La distribución de la superficie oceánica es normal y simétrica cuando el oleaje se encuentra completamente desarrollado [14], es decir, que el oleaje tiene un comportamiento estable. En la Figura 6.4.5 se ilustra el ajuste de las alturas reconstruidas usando la interpolación y los filtros propuestos. Vemos una mayor tendencia de los datos hacia una distribución normal. El ajuste del umbral y la zona a procesar son explicados en la siguiente sección. La normalidad de las alturas reconstruidas mejora dependiendo de estos dos parámetros.

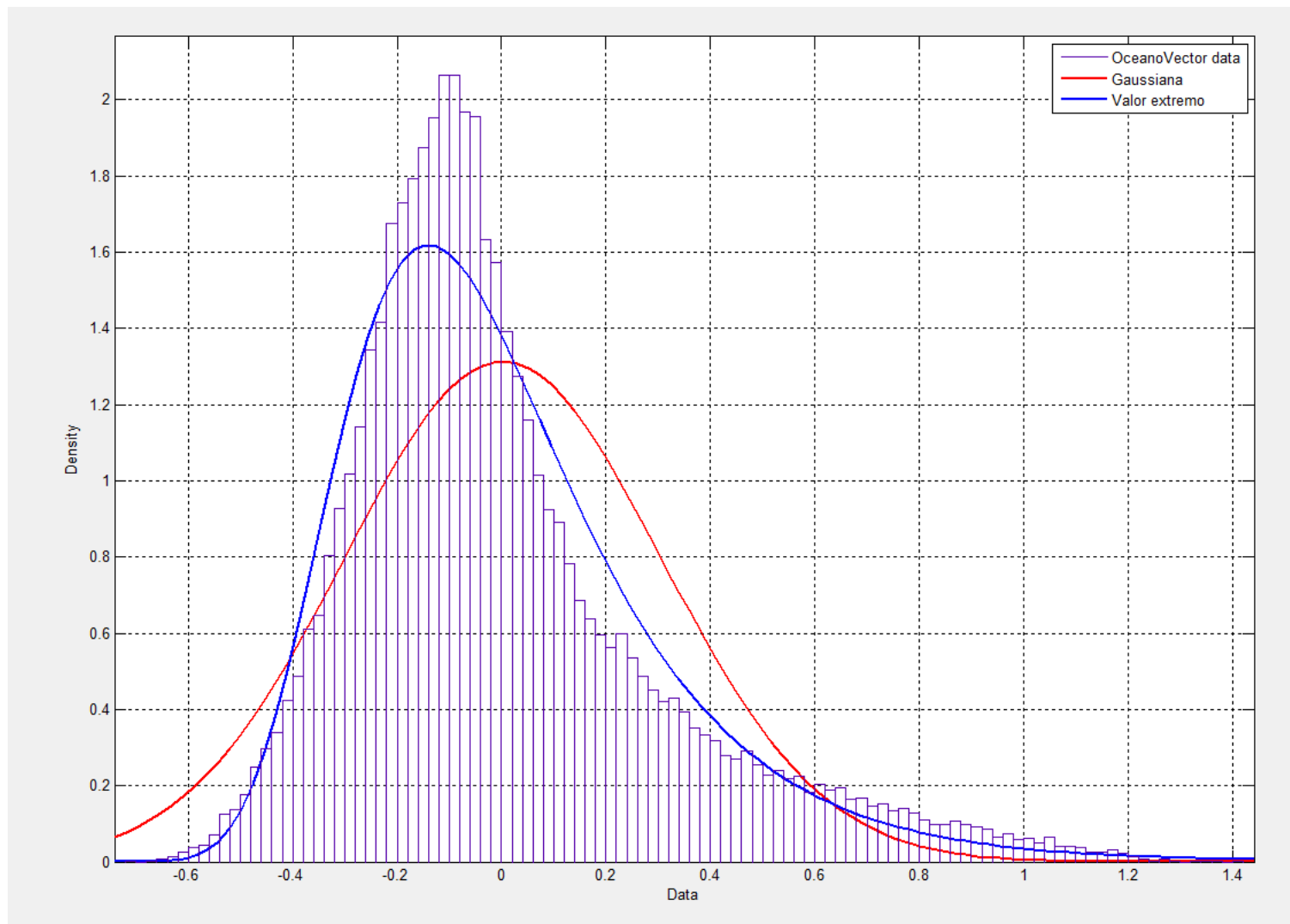


Figura 6.4.4. Ajuste de valore de alturas reconstruidas sin interpolación

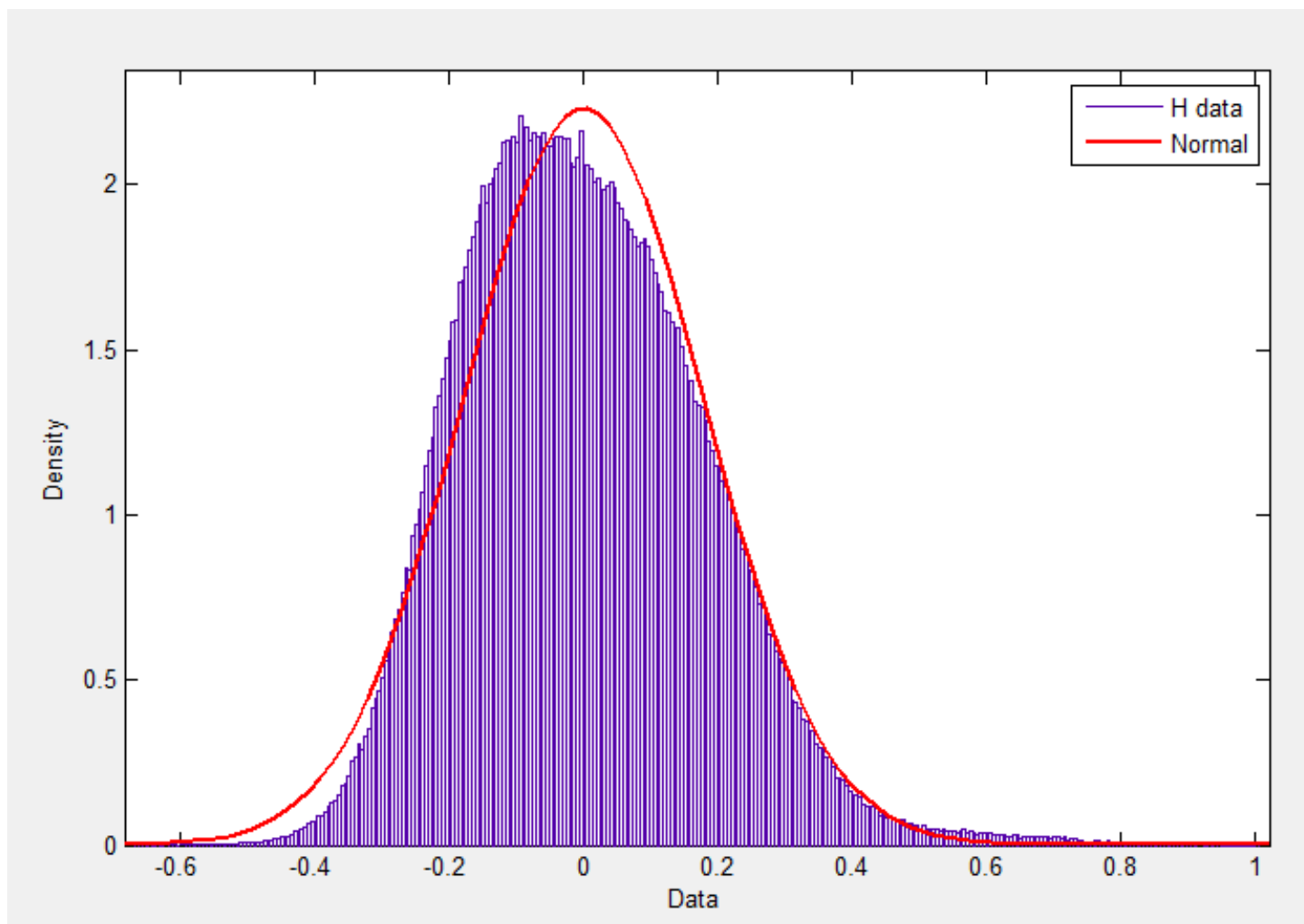


Figura 6.4.5. Ajuste de valore de alturas reconstruidas con interpolación

# 7. EXPERIMENTACIÓN Y VALIDACIÓN

## 7.1. Diseño de experimentos para encontrar los parámetros recomendables de funcionamiento (umbral y tamaño de venta)

A continuación se presenta el diseño de experimentos para hallar los parámetros de radar que reduzcan el error en la estimación de la Hs. Se utilizaron como factores el tamaño de la ventana a procesar y el umbral de interpolación para reducir el efecto de sombra. Estos factores fueron escogidos debido a que están directamente relacionados con el efecto de sombreado. Al tomar una ventana más pequeña en un rango cercano, la cantidad de datos ensombrecidos será menor. Las intensidades que sean menores a un umbral son consideradas como sombra e interpoladas. Por lo cual, la escogencia de un umbral óptimo mejoraría los datos a procesar. Los parámetros que se dejaron fijos en cada experimento fueron los filtros usados, el algoritmo para reconstruir Hs y el método para hallar el rayo perpendicular.

### **Parámetros:**

1. **Filtros usados:** Debido a que se cambia el tamaño de la ventana o región a procesar, se deben mantener las características de los filtros usados. En el espectro, tomar más datos implica un aumento en la resolución espectral. Por lo cual, se debe escalar los filtros a utilizar dependiendo del tamaño de la venta. A continuación se muestran los filtros usados para ventanas de 50x50, 100x100 y 200x200 pixeles. Se



aprecia que siguen siendo los mismos filtros sólo que unos con más resolución que otros, dependiendo del tamaño de la ventana.

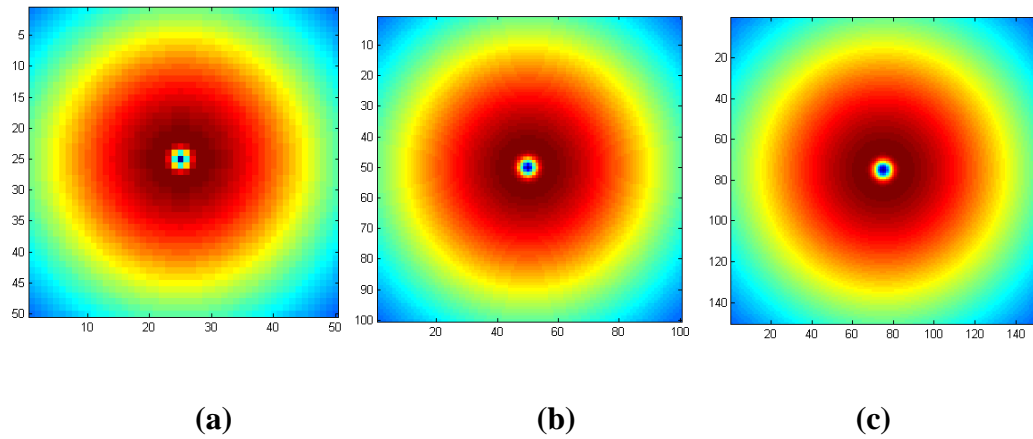


Figura 7.1.1. Filtro Gaussiano (a) ventana de 50x50 píxeles, (b) ventana de 100x100 píxeles, (c) ventana de 200x200 píxeles

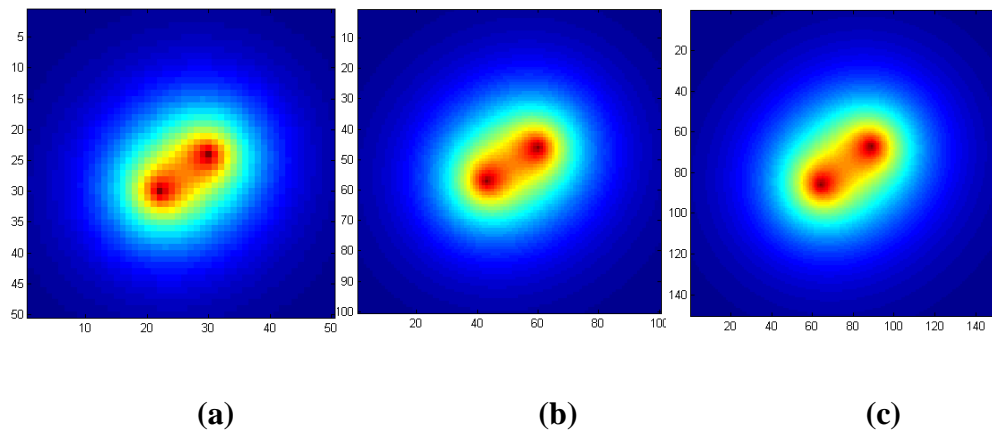


Figura 7.1.2. Filtro Gabor (a) ventana de 50x50 píxeles, (b) ventana de 100x100 píxeles, (c) ventana de 200x200 píxeles

2. **Algoritmo para reconstruir Hs:** Para cada experimento se utilizó el mismo algoritmo de reconstrucción de la superficie descrito. En la experimentación se varió la cantidad de datos para hallar Hs en función del tamaño de la ventana.
3. **Método para hallar el rayo perpendicular:** El método explicado en la sección 5.5.2 es usado hallar la dirección del oleaje y la creación del filtro de Gabor. Los puntos donde se encuentra centrado el filtro de Gabor son determinados por la dirección del oleaje. En cada experimento se dejó fijo este parámetro. Se puede apreciar en la Figura 7.1.2 que se sigue conservando la dirección del filtro al variar el tamaño de la ventana.

### **Factores**

1. **Tamaño de la ventana a procesar:** Se varió el tamaño de la ventana o región que contiene los datos a procesar. Se utilizaron tamaños de 50x50, 100x100, 150x150, 200x200 pixeles. Un tamaño de ventana inferior a 50x50 pixeles no brinda una buena resolución espectral para realizar el filtrado. Tamaños superiores a 200x200 se salen del rango medible de la imagen de *clutter*. En las siguientes dos figuras se muestran las zonas procesadas para ventanas de 100x100 y de 200x200 pixeles respectivamente:

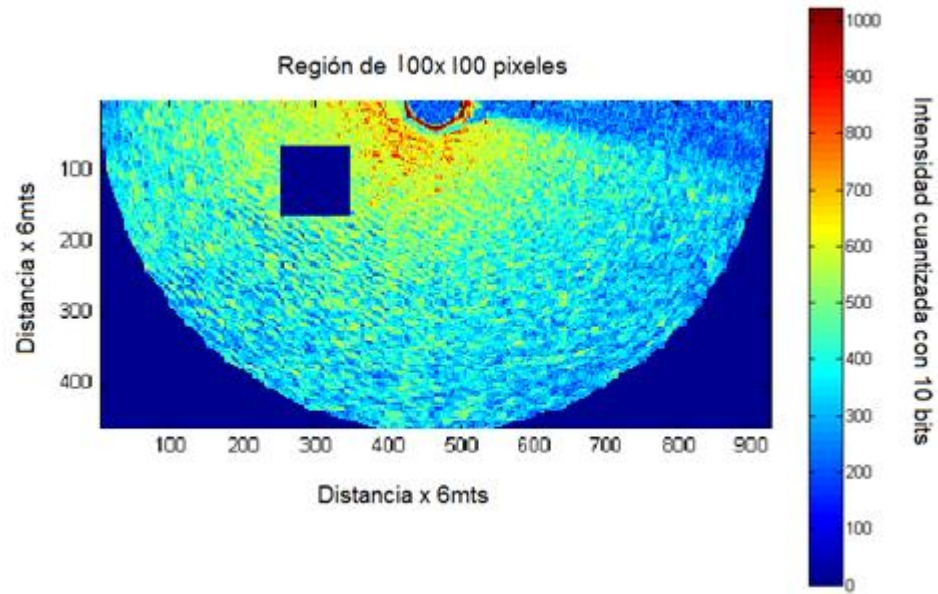


Figura 7.1.3. Ventana de 100x100 pixeles

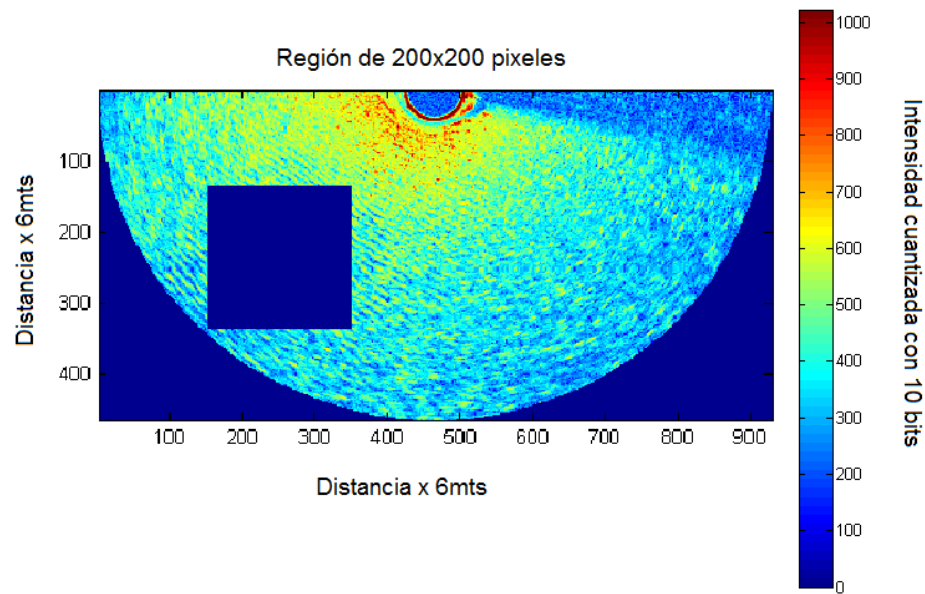


Figura 7.1.4. Ventana de 200x200 pixeles

2. **Umbral de interpolación:** Para la corrección del efecto de sombreado se interpolan los puntos que estén por debajo de un umbral en su valor de intensidad. Estos

puntos son considerados como sombras. Se utilizaron umbrales de 200, 250, 300, 350. También se incluyó el caso en el que no se aplica el proceso de interpolación.

3. **Diseño:** Se usó un diseño factorial completo comparando la Hs reconstruida con la medida por ecosonda. La comparación se hizo mediante el error relativo. Se procesaron bloques de 255 imágenes de radar consecutivas para extraer Hs. Se varió el tamaño de la ventana y el umbral para la interpolación en cada bloque, extrayendo la Hs para cada bloque. Se excluyeron los bloques donde la Hs reconstruida mostrara un comportamiento atípico con respecto a las Hs reconstruidas en el resto de bloques. En total se analizaron 9 bloques. Por lo cual, El número de experimentos viene dado por:

$$\#Experimentos = 9 \times \prod_{i=1}^2 n_i = 9 \times 4 \times 5 = 180$$

Donde  $n_i$  corresponde a los niveles que se usaron para cada factor. Se tomaron 4 diferentes tamaños de ventana y 5 umbrales de interpolación.

### **Resultados:**

Se analizaron los datos con los tamaños de venta y umbral que mostraran menor error y que fueran más estables. A continuación se presenta el promedio de los errores relativos porcentuales para cada experimento:

TABLA 7.1. Promedio del error relativo porcentual

<b>Vent/Umb</b>	<b>Vent50</b>	<b>Vent100</b>	<b>Vent150</b>	<b>Vent200</b>
<b>Umbral 200</b>	6,66	13,17	16,38	14,77
<b>Umbral 250</b>	6,63	13,03	16,17	14,56
<b>Umbral 300</b>	5,84	10,08	12,18	10,52
<b>Umbral 350</b>	4,76	5,03	5,54	5,06
<b>Sin umbral (0)</b>	6,68	13,32	16,60	14,99

La influencia de los factores en el error relativo fue hecha a través de un análisis de varianza (ANOVA). Se encontró que el tamaño de la ventana y umbral utilizado tienen una influencia significativa en el error relativo entre la Hs entregada por la ecosonda y la reconstruida a partir de las intensidades de radar, tal como se esperaba. En la siguiente sección se muestra la tabla ANOVA y se analiza en detalle los resultados.

En la Figura 7.1.5 se muestra la altura significativa reconstruida para aquellas configuraciones que mostraron un bajo y estable error relativo junto con la arrojada por la ecosonda. Se puede apreciar que la Hs reconstruida sigue los datos de la ecosonda con un error bajo.

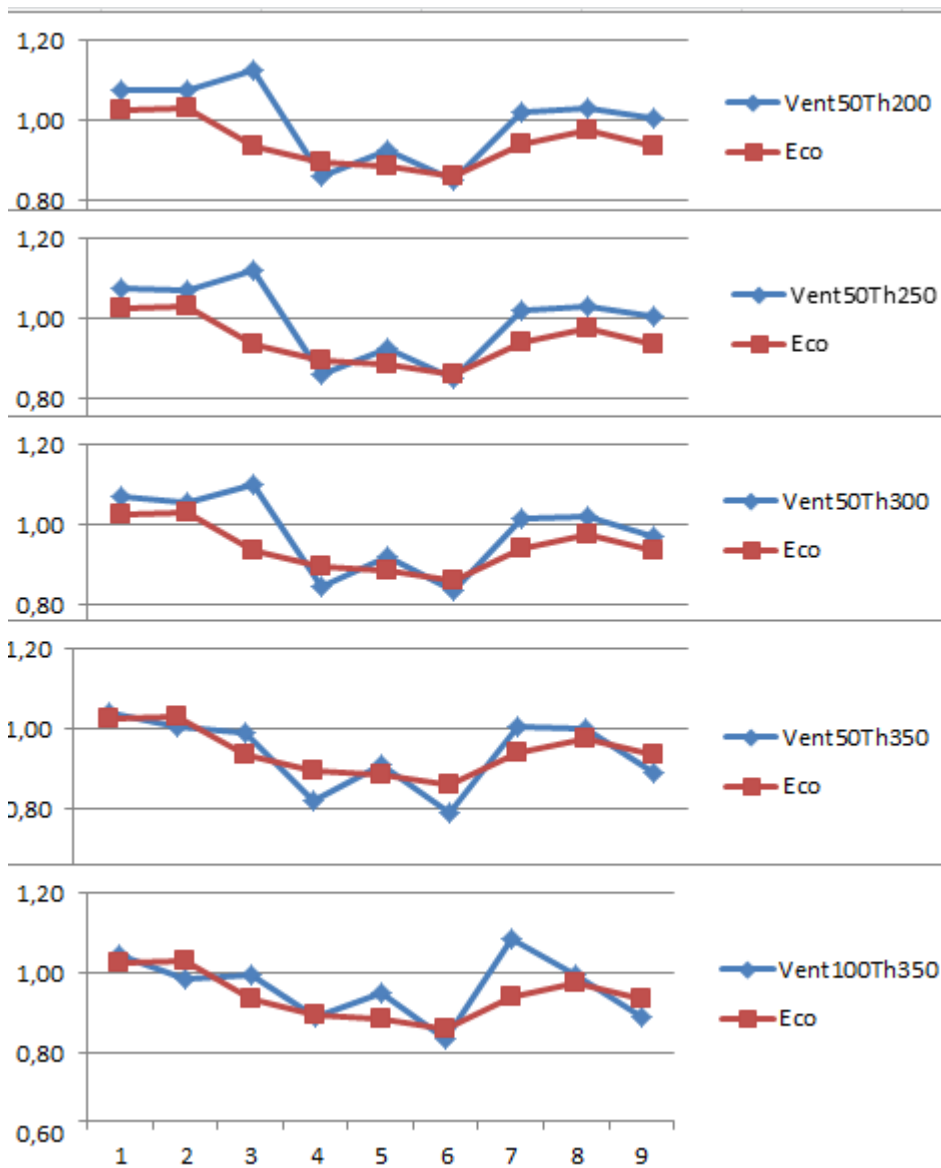


Figura 7.1.5. Curva Hs para las configuraciones que mejor se ajustaron a los datos,  
VentNNThMM, NN: Tamaño de venta; Th: umbral (*Threshold*) MM: Valor del umbral

Las Hs reconstruidas que en promedio mostraron menor error se obtuvieron tomando una ventana 50x50 pixeles y un umbral de 350. Sin embargo, para estos valores la Hs reconstruida sub-estima en la mayoría de casos a la reportada por la ecosonda. Para una ventana de 100x100 pixeles y un umbral de 350, los datos no muestran en promedio un

error muy alto y en su mayoría sobre-estiman el valor de la ecosonda. Cuando la sub-estiman, el error no supera el 5%. Se sugiere sobre estimar  $H_s$  para la generación de alertas, debido a que reduce la cantidad de falsos negativos [14].

## 7.2. Validación estadística y espectral

La validación estadística de los datos se hizo mediante el análisis de la varianza de los errores relativos. El anterior procedimiento se hizo con el fin encontrar si los errores relativos se veían afectados por los diferentes niveles que pudiesen tomar los factores propuestos. La validación espectral se hizo comparando la PSD del oleaje reconstruido con la PSD de la ecosonda. También, se realizó una prueba de bondad para validar la normalidad de las alturas reconstruidas con la configuración propuesta.

### Análisis de varianza:

Se utilizó el análisis de varianza para averiguar si el tamaño de la ventana y el umbral utilizado tienen algún efecto el error relativo. A continuación se muestra la Tabla ANOVA hallada con los valores de errores relativos.

TABLA 7.2. Análisis de Varianza para Error relativo - Suma de Cuadrados Tipo III

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Umbral	1621,31	4	405,327	12,21	0,0000
B:Tamaño de ventana	1342,1	3	447,365	13,48	0,0000
INTERACCIONES					
AB	331,477	12	27,6231	0,83	0,6169
RESIDUOS	5309,3	160	33,1831		
TOTAL (CORREGIDO)	8604,18	179			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Donde la *Suma de Cuadrados* de los niveles corresponde al aporte en el error total de la interacción de las variables con los niveles, es decir, el umbral y el tamaño de la ventana. *Gl* hace referencia a los grados de libertad y el *Cuadrado Medio* al promedio de

los errores producidos por la interacción con los niveles. Se utilizó el estadístico de prueba F de Fisher.

Los valores P prueban la significancia estadística de cada uno de los factores. Puesto que tanto el valor P para el umbral y el del tamaño de ventana son menores que 0,05, estos factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre el error relativo con un 95,0% de nivel de confianza [38]. Esto quiere decir que el tamaño de la ventana y el umbral de interpolación afectan el desempeño de los algoritmos de reconstrucción de la superficie oceánica analizados.

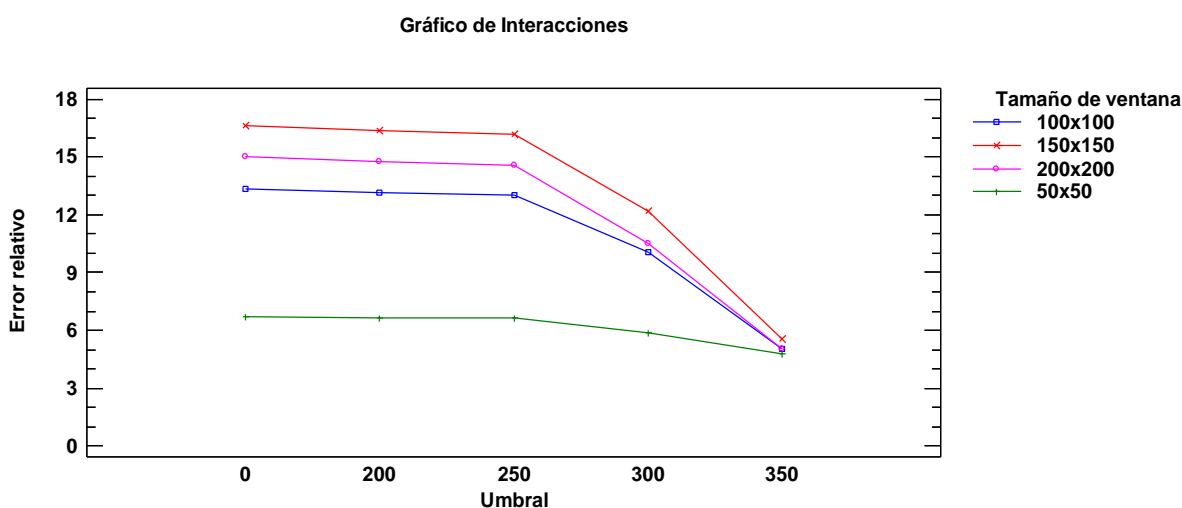


Figura 7.2.1. Gráfico de interacciones de los factores

En la Figura 7.2.1 se muestra el gráfico de interacciones de los factores analizados. Se puede apreciar que el error relativo con respecto al umbral mantiene una tendencia decreciente para los diferentes tamaños de ventana. Debido a esto, se puede afirmar que no hay una interacción entre el umbral y el tamaño de la ventana. El anterior comportamiento se evidencia también en la Tabla ANOVA. El aporte producto de la interacción entre el



umbral y el tamaño de la venta (AB) no es significativo de acuerdo al P valor obtenido (0,6169).

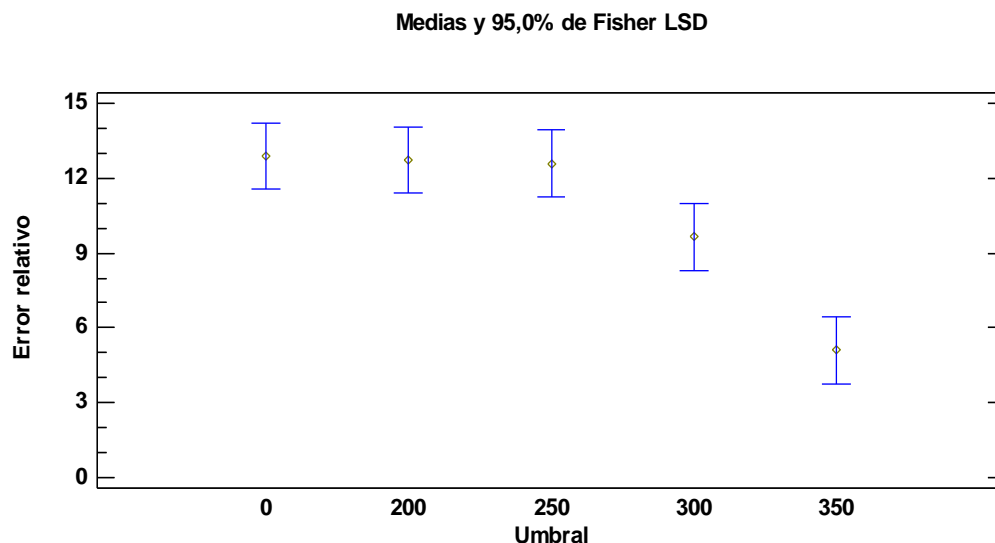


Figura 7.2.2. Medias y dispersión del error relativo con respecto al umbral

En la Figura 7.2.2 se ilustran las medias y dispersiones (intervalos de confianza) de los errores con respecto al umbral de interpolación. Los intervalos de confianza indican que no se puede concluir diferencia estadística para los errores obtenidos con umbrales de 0, 200 y 250. Solamente los umbrales de 300 y 350 mostraron diferencia estadística, siendo los errores obtenidos con un umbral de 350 menores que los obtenidos con un umbral de 300.

### **Ajustes de histogramas:**

Se debe recordar que la distribución de la superficie del océano es normal cuando el oleaje está completamente desarrollado [14]. En la Figura 7.2.3 se muestra el histograma de las alturas medidas por la ecosonda junto con un ajuste normal de los datos.

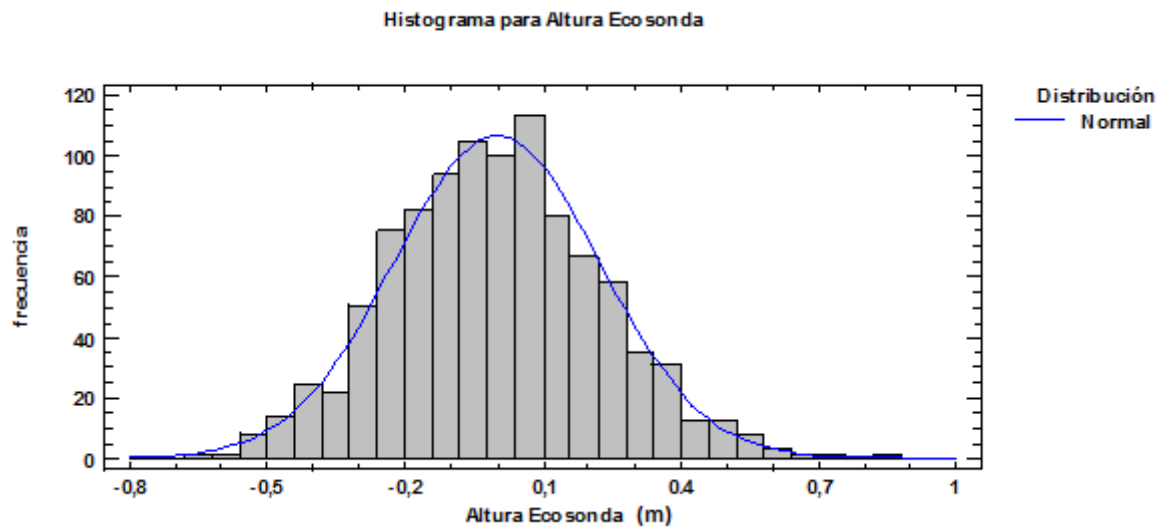


Figura 7.2.3. Histograma de altura de la ecosonda

TABLA 7.3. Pruebas de Bondad-de-Ajuste para Alturas ecosonda

Prueba de Kolmogorov-Smirnov Ecosonda

	<i>Normal</i>
DMAS	0,0826
DMENOS	0,0411
DN	0,0826
Valor-P	0,0605

En la TABLA 7.3 se muestra una prueba de normalidad hecha a los datos de la ecosonda. Se usó la prueba de bondad de Kolmogorov-Smirnov. Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que los datos de la ecosonda provienen de una distribución normal con 95% de confianza. Lo anterior quiere decir que los datos arrojados por la ecosonda provienen de un proceso gaussiano. Debido a lo anterior, se esperaría que las alturas reconstruidas también

siguieran la misma tendencia normal. A continuación se muestran las pruebas realizadas a las alturas reconstruidas para una ventana de 100x100 píxeles y un umbral de 350:

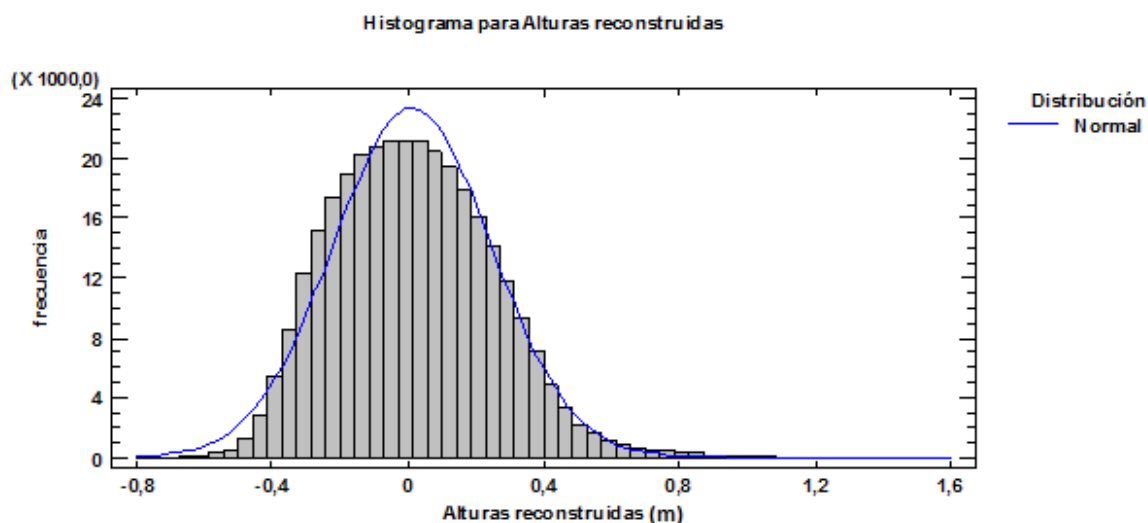


Figura 7.2.4. Histograma de alturas reconstruidas

TABLA 7.4. Pruebas de Bondad-de-Ajuste para Alturas reconstruidas

Prueba de Kolmogorov-Smirnov

Alturas reconstruidas

	<i>Normal</i>
DMAS	0,0289
DMENOS	0,018
DN	0,029
Valor-P	<b>0,001</b>

En la Figura 7.2.4 se muestra el histograma de las alturas reconstruidas. Se puede apreciar que aunque la tendencia de los datos es normal, se presenta un leve sesgo en los datos. La prueba de normalidad realizada a los datos indicó que: el valor-P más pequeño es

menor a 0,05. Por lo cual, se puede rechazar la idea de que las alturas reconstruidas provengan de una distribución normal con 95% de confianza.

A pesar del anterior resultado, la comparación con diferentes distribuciones indicó que de acuerdo con el estadístico log verosimilitud, la distribución que mejor se ajusta a las alturas reconstruidas es la Normal. Es decir, aun cuando las pruebas de normalidad indican que las alturas reconstruidas no provienen de un proceso gaussiano, la distribución que mejor ajusta a estos datos es la Normal.

TABLA 7.5. Comparación de Distribuciones Alternas

<i>Distribución</i>	<i>Parámetros Est.</i>	<i>Log Verosimilitud</i>	<i>KS D</i>
Normal	2	11548,9	0,0289796
Valor Extremo Más Grande	2	8143,74	0,0422683
Logística	2	7125,87	0,0311643
Laplace	2	-9348,77	0,0548314
Valor Extremo Más Chico	2	-32501,6	0,0968861
Uniforme	2	-192612,	0,353509
Exponencial	1	-1,E9	1,84636E24
Weibull	2	-1,E9	0,498227
Gamma	2	-1,E9	0,498227
Pareto	1	-1,E9	0,999792
Loglogística	2	-1,E9	0,553579
Lognormal	2	-3,20001E14	0,498712
Gaussiana Inversa	2	-3,20001E14	0,501773
Birnbaum-Saunders	<sin ajuste>		

### Validación espectral:

Se realizó un análisis espectral entre los datos arrojados por la ecosonda y las alturas reconstruidas. El análisis se hizo comparando los picos de intensidad para cada caso. Lo anterior debido a que los picos de intensidades en el espectro brindan información sobre el periodo del oleaje [14]. Los datos utilizados para calcular la PSD de la ecosonda fueron tomadas durante el mismo intervalo de tiempo en que el radar obtenía las intensidades. La Figura 7.2.5 muestra la PSD de la ecosonda y en la Figura 7.2.6 se muestra la PSD de las alturas reconstruidas. La PSD de la ecosonda mostró su pico de intensidad más alto en 143 mHz, mientras que para las alturas reconstruidas el valor más alto fue de 152 mHz. El periodo del oleaje se calcula con el inverso multiplicativo de estas frecuencias. Por esto, el periodo de la ecosonda es de 6.99 s. y el período encontrado a través de esta investigación es de 6.58 s. El error relativo entre estos dos periodos calculados es del 6%.

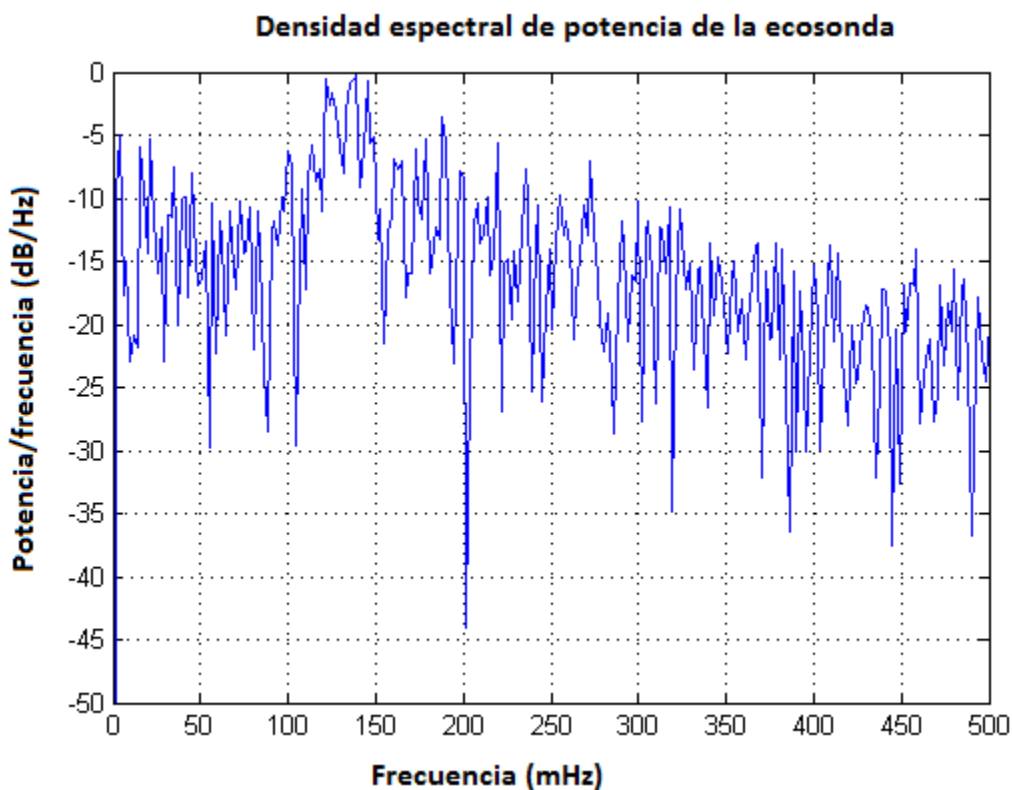


Figura 7.2.5. Densidad espectral de potencia de la ecosonda

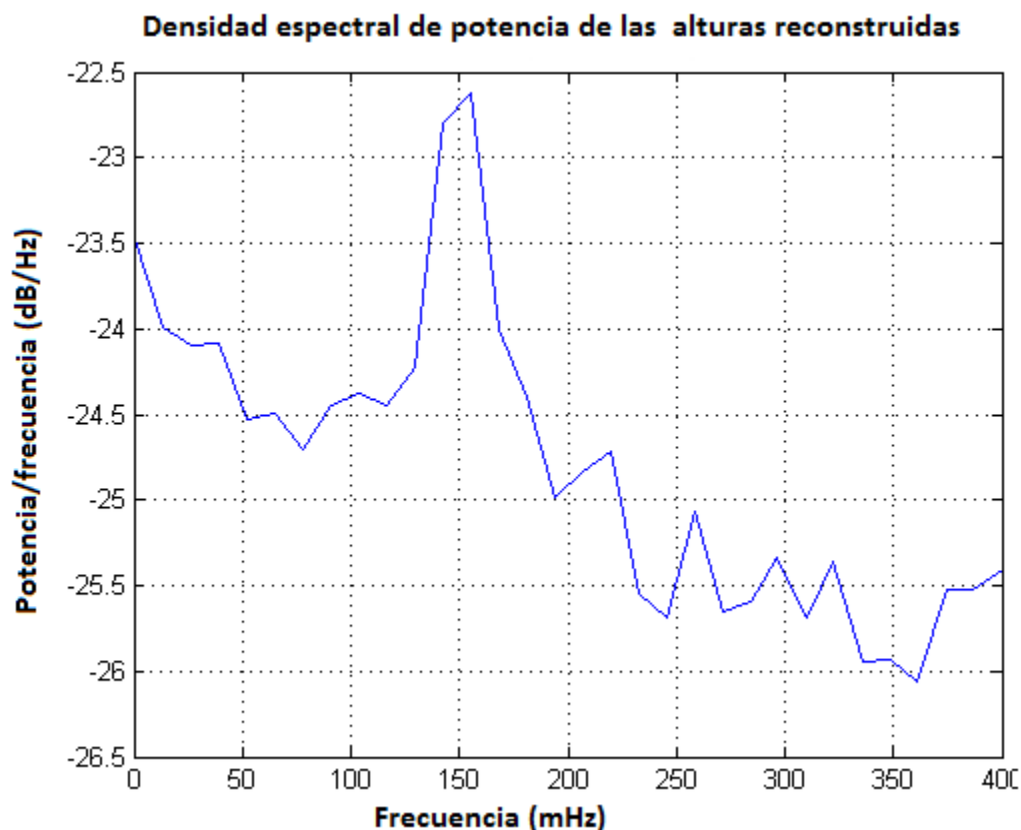


Figura 7.2.6. Densidad espectral de potencia para las alturas reconstruidas

Cabe anotar que los datos obtenidos por la ecosonda muestran un alto ruido en su espectro, lo cual se atribuye a la forma en que se hace la medida (descrita en la sección 5.1). Adicionalmente, no se cuenta con una uniformidad temporal en la toma de los datos. La ecosonda presenta saltos temporales que afectan el cálculo del periodo de las olas. En la Tabla 7.6 se muestra resaltado uno de estos saltos. Lo anterior limita la validación del periodo obtenido mediante intensidades de radar. Se requieren futuras investigaciones con sensores más precisos para realizar esta validación.

TABLA 7.6. Datos Ecosonda

HORA	PROFUNDIDAD
12:48:30	8,93
12:48:31	8,81
12:48:32	9,16
12:48:33	9,03
12:48:38	9
12:48:39	8,98
12:48:40	8,74

## 8. CONCLUSIONES Y FUTUROS TRABAJOS

### 8.1. Conclusiones

Los resultados obtenidos mostraron que es posible la reconstrucción de la superficie del océano a partir de intensidades de radares ubicados en plataformas costeras. La distribución de las alturas reconstruidas mostró una tendencia normal como la teórica esperada. La inclusión del algoritmo de interpolación propuesto mejoró el desempeño de los métodos de reconstrucción, reduciendo el error relativo con respecto las medidas *in situ*.

Se logró extraer los parámetros principales que caracterizan el estado del mar; la altura significativa, el periodo y la dirección de propagación del oleaje. La comparación de la altura significativa reconstruida y la arrojada por la ecosonda mostró errores relativos promedios menores al 5%.

Se encontró que el tamaño de la región analizada y el umbral de interpolación tienen un efecto significativo en el error relativo de la altura significativa reconstruida. El error disminuye a medida que se reduce el tamaño de la región procesada o se aumenta el umbral para la interpolación para las configuraciones analizadas. Sin embargo, umbrales menores a 300 no generaron diferencias significativas en el error relativo de la altura significativa. Los anteriores resultados son sólo válidos para el radar y el tipo de configuración del ADC utilizados para esta investigación.



Se logró calcular la dirección y el periodo del oleaje a través de la investigación propuesta. No fue posible comparar dichos resultados con datos medidos in situ debido a la falta de equipos especializados de medida. Sin embargo los resultados obtenidos se asemejan a los encontrados en la literatura y a la inspección visual realizada.

## **8.2. Futuros trabajos**

A continuación se presentan trabajos propuestos para mejorar y aumentar la robustez de los algoritmos de procesamiento implementados:

- Caracterizar el sombreado mediante la dispersión de los datos a lo largo del rango.
- Estandarizar el método de reducción de los efectos de sombreado para que pueda ser usado en otros esquemas o radares diferentes al de esta investigación.
- Realizar experimentos para caracterizar la distribución de las intensidades de radar afectadas por el efecto de sombreado.
- Analizar la influencia de la altura en que se ubica la antena del radar en las intensidades de afectadas por el sombreado.
- Adquirir más datos para validar y ajustar los algoritmos de reconstrucción empleados.
- Analizar la influencia de la sintonización del radar en los algoritmos de reconstrucción.
- Validar con instrumentos adecuados el periodo y la dirección del oleaje.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] W. S. Wagner Forero, “Boletín Meteorológico Mensual del Caribe Colombiano,” Cartagena, 2012.
- [2] A. Serrano, J. Posada, J. C. Vélez, and M. Alvarado, “SENSADO REMOTO DE OLEAJE MEDIANTE SEÑALES DE RADAR,” in *XX SEMINARIO NACIONAL DE HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA*, 2013, p. 10.
- [3] Nauticexpo, “<http://www.nauticexpo.es/fabricante-barco/boya-oceanografica-22980.html>.” .
- [4] Furuno, “[http://www.furuno.com/en/business\\_product/detail/marine/index.php?prcd=DRS4A&category=Radar&business=workboats](http://www.furuno.com/en/business_product/detail/marine/index.php?prcd=DRS4A&category=Radar&business=workboats).” .
- [5] L. B. Wetzel, “Electromagnetic Scattering from the Sea at Low Grazing Angles,” in *Surface Waves and Fluxes, Volume II — Remote Sensing*, 1990, pp. 109–171.
- [6] K. Reichert, K. Hessner, J. C. N. Borge, and J. Dittmer, “WAMOS II: A Radar Based Waved and Current Monitoring System,” in *ISOPE*, 1999, vol. 3, no. May, pp. 1–5.
- [7] M. I. Skolnik, *Radar Handbook*, vol. 7, no. 1. McGraw-Hill, 1990, p. 1328.
- [8] M. I. Skolnik, *Introduction to Radar Systems*, 3rd ed. McGraw-Hill, 2001, p. 772.
- [9] M. A. Richards, *Fundamentals of Radar Signal Processing*, 1st ed. Nueva York: McGraw-Hill, 2005.
- [10] F. T. Ulaby, R. K. Moore, and A. K. Fung, “Microwave remote sensing: Active and passive. Volume 1 - Microwave remote sensing fundamentals and radiometry,” *Microw. Remote Sens. Act. Passiv.*, vol. 1, no. 1, p. 456, 1981.
- [11] P. H. Y. Lee, J. D. Barter, K. L. Beach, C. L. Hindman, B. M. Lake, H. Rungaldier, J. C. Shelton, A. B. Williams, R. Yee, and H. C. Yuen, “X band microwave backscattering from ocean waves,” *Journal of Geophysical Research*, vol. 100, no. C2, p. 2591, 1995.
- [12] D. B. Trizna, “A model for Brewster angle damping and multipath effects on the microwave radar sea echo at low grazing angles,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 35, no. 5, 1997.

- [13] W. R. Alpers, D. B. Ross, and C. L. Rufenach, "On the detectability of ocean surface waves by real and synthetic aperture radar," *Journal of Geophysical Research*, vol. 86, no. C7, p. 6481, 1981.
- [14] M. K. Ochi, *Ocean waves : the stochastic approach*. CAMBRIDGE UNIVESRITY PRESS, 2005, p. 332.
- [15] J. Pedlowsky and J. Miles, "Waves in the Ocean and Atmosphere: Introduction to Wave Dynamics," *Applied Mechanics Reviews*, vol. 57, no. 4, p. B20, 2004.
- [16] L. H. Holthuijsen, *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. Cambridge University Press, 2007, p. 404.
- [17] I. R. Young, W. Rosenthal, and F. Ziemer, "A Three-Dimensional Analysis of Marine Radar Images for the Determination of Ocean Wave Directionality and Surface Currents," *J. Geophys. Res.*, vol. 90, no. C1, pp. 1049–1059, 1985.
- [18] G. Valenzuela and M. Laing, "Ocean spectra for the high-frequency waves as determined from airborne radar measurements," *J. Mar. Res.*, vol. VOL 29, no. 2, pp. 69–84, 1971.
- [19] F. Ziemer and H. Günther, "A system to monitor ocean wave fields," in *Second International Conference on Air-Sea Interaction and Meteorology and Oceanography of the Coastal Zone*, 1994.
- [20] W. Rosenthal, "Results of the MAXWAVE project," *Inst. Coast. Res. Geesthacht, Ger.*, vol. 11, no. 1, pp. 1–7, 1995.
- [21] J. Borge and K. Hessner, "Estimation of the significant wave height with X-band nautical radars," *Proc. 18th Int. Conf. Offshore Mech.*, no. C, pp. 1–8, 1999.
- [22] J. N. Borge, "Inversion of marine radar images for surface wave analysis," *J. Atmos. Ocean. Technol.*, vol. 21, no. 8, pp. 1291–1300, 2004.
- [23] H. Dankert, J. Horstmann, and W. Koch, "Ocean wind fields retrieved from radar-image sequences," *Geosci. Remote Sens.*, vol. 00, no. C, pp. 17–19, 2002.
- [24] H. Dankert and W. Rosenthal, "Retrieval of ocean surface wave fields using marine radar-image sequences," *Geosci. Remote Sens. ...*, pp. 1884–1887, 2004.
- [25] H. Dankert and W. Rosenthal, "Ocean surface determination from X-band radar-image sequences," *J. Geophys. Res.*, vol. 109, no. Ocean, pp. 1–11, 2004.
- [26] H. Dankert and J. Horstmann, "Ocean surface winds retrieved from marine radar-image sequences," *Geosci. Remote Sens.*, pp. 1903–1906, 2004.

- [27] H. Dankert and J. Horstmann, "A Marine Radar Wind Sensor," *J. Atmos. Ocean. Technol.*, vol. 24, no. 9, pp. 1629–1642, Sep. 2007.
- [28] F. Serafino, C. Lugni, J. C. N. Borge, V. Zamparelli, and F. Soldovieri, "Bathymetry determination via X-band radar data: a new strategy and numerical results.," *Sensors (Basel)*, vol. 10, no. 7, pp. 6522–34, Jan. 2010.
- [29] F. Serafino, C. Lugni, and F. Soldovieri, "Sea surface topography reconstruction from X-band radar images," *Adv. Geosci.*, vol. 19, pp. 83–86, 2008.
- [30] R. J. Ramos, B. Lund, and H. C. Graber, "Determination of internal wave properties from X-Band radar observations," *Ocean Eng.*, vol. 36, no. 14, pp. 1039–1047, Oct. 2009.
- [31] J. Nieto-Borge and P. Jarabo-Amores, "Estimation of Ocean Wave Heights from Temporal Sequences of X-Band Marine Radar Images," in *14th European Signal Processing Conference*, 2006, no. Eusipco.
- [32] J. C. Nieto-Borge, K. Hessner, P. Jarabo-Amores, and D. de la Mata Moya, "Analysis of sea state parameters and ocean currents from temporal sequences of marine radar images of the sea surface," *2008 IEEE Radar Conf.*, pp. 1–5, May 2008.
- [33] A. Mendoza Serrano, "Modelado y simulación de clutter de mar en base a la interacción onda electromagnética - superficie de mar," Universidad del Norte, 2011.
- [34] J. Johnson and R. Burkholder, "A numerical study of the retrieval of sea surface height profiles from low grazing angle radar data," *Geosci. Remote Sens.*, vol. 47, no. 6, pp. 1641–1650, 2009.
- [35] C. Chae, "A study of sea surface height retrieval using Doppler measurements from numerically simulated low grazing angle backscatter data," *Geosci. Remote Sens.*, pp. 1461–1464, 2011.
- [36] Z. R. Halllock and W. J. Teague, "Sea surface height fluctuations observed simultaneously with inverted echo sounders and Geosat," *J. Geophys. Res.*, vol. 98, no. C9, pp. 16341–16349, 1993.
- [37] J. C. Nieto Borge and C. Guedes Soares, "Analysis of directional wave fields using X-band navigation radar," *Coastal Engineering*, vol. 40, no. 4, pp. 375–391, 2000.
- [38] R. E. Walpole, R. H. Myers, S. L. Myers, and K. Ye, *Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias*. Prentice Hall, 2007, p. 794.